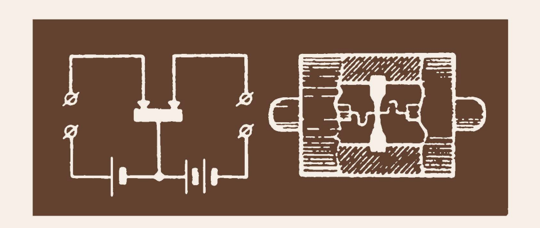


А. Ф. БЕЛЯЕВ и В. Н. ЛОГИНОВ

КРИСТАЛЛИЧЕСКИЕ ДЕТЕКТОРЫ И УСИЛИТЕЛИ





ГОСЭНЕРГОИЗДАТ

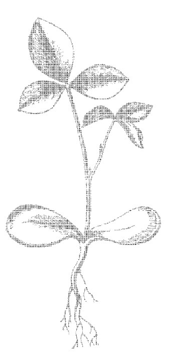
МАССОВАЯ РАДИО БИБЛИОТЕКА

ПОД ОБЩЕЙ РЕДАКЦИЕЙ АКАДЕМИКА А. И. БЕРГА

Выпуск 115

БЕЛЯЕВ А. Ф. и ЛОГИНОВ В. Н.

КРИСТАЛЛИЧЕСКИЕ ДЕТЕКТОРЫ И УСИЛИТЕЛИ



Scan AAW



ГОСУДАРСТВЕННОЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЕ ИЗДАТЕЛЬСТВО

МОСКВА 1951 ЛЕНИНГРАД

Книга содержит популярное изложение физических процессов, происходящих в кристаллических детекторах и усилителях. В ней приводятся описания различных схем, использующих кристаллические усилители.

Книга рассчитана на радиолюбителей со средней технической подготовкой, однако может представлять интерес и для широких кругов читателей, интересующихся новостями техники.

СОДЕРЖАНИЕ

Редактор *Никитин Н. А.* Технич. редактор *Ларионов Г. Е.*

Сдано в набор 31/III 1951 г. Подписано к печати 11/VIII 1951 г.
Бумага $84 \times 108^1/_{32}$=1 бумажн. лист. – 3,28 п. л. Уч.-изд. л. 3,6.
Т-05554 Тираж 25 000 экз. Заказ 1146

Типография Госэнергоиздата. Москва. Шлюзовая наб., 10.

ВВЕДЕНИЕ

Более полувека прошло с того момента, когда на заседании Русского физико-химического общества великий русский изобретатель А. С. Попов продемонстрировал свой знаменитый грозоотметчик. Вполне допустимо, что самому физическому процессу детектирования, как таковому, тогда еще не придавалось большого значения, однако совершенно ясно, что когда помощнику Попова П. Н. Рыбкину удалось принять первую в мире радиопередачу на телефонные трубки, в приборе должен был находиться нелинейный элемент — детектор. Таким образом, детектор, как элемент приемного устройства, существовал еще на заре развития радиосвязи.

Вскоре стало очевидным, что без удовлетворительного выпрямителя не может нормально функционировать почти ни одно радиоприемное устройство, и сознание этого потребовало коренного пересмотра вопроса о рациональном выборе и изготовлении детектора. Инженеры стали усиленно изучать свойства детекторов и изыскивать средства повышения их эффективности.

В имевшейся литературе по физике и химии того времени приводились лишь некоторые отдельные (хотя и имевшие иногда большую историческую давность) указания на то, что некоторые материалы обладают не совсем обычными свойствами — они хорошо пропускают ток в одном направлении и плохо в другом. Так, например, еще Берцелиус заметил, что кремний не подчиняется общеизвестным законам для проводников, что он обладает униполярной проводимостью.

Но, к сожалению, как все проведенные ранее, так и многочисленные последующие исследования кристаллов и детектирующих пар до самого последнего времени произ-

водились ощупью, без соответствующего научного обоснования, чисто эмпирическим путем. Испытывались многие тысячи различных кристаллов и игл и из них отбирались те, которые хотя бы немного удовлетворяли исследователя по характеристикам и устойчивости. Такие детекторы были очень чувствительны к давлению на контакте, неустойчивы в работе и не обладали высокой чувствительностью. Для нахождения чувствительной точки на детекторе необходимо было произвести целый ряд проб, менять степень нажатия пружинки, — а все это занимало значительное время.

Поэтому желанием всех работавших с приемными устройствами было создание такого детектора, который, имея хорошую характеристику, был бы по возможности стабильным во времени.

Однако бурное развитие ламповой техники вскоре вытеснило кристаллический детектор, и о нем забыли, но ненадолго. Широкое применение дециметровых и сантиметровых волн потребовало разработки выпрямителей, обладающих как можно более низким уровнем шумов. Многочисленные изыскания вынудили радиоспециалистов отказаться от вакуумных ламп и обратиться снова к кристаллам, обладающим перед лампами рядом преимуществ.

Дело в том, что усиление и уровень шумов в у. в. ч. приемнике в значительной мере определяются параметрами входных цепей и данными 1-го преобразователя частоты. Из-за значительного уровня шумов на этих волнах возможно применение только тех электронных приборов, коэффициент усиления которых при слабых сигналах близок к единице. Но, как известно, все усилительные лампы имеют коэффициент усиления значительно больше этой величины. К тому же большие межэлектродные емкости и инерционность электронов ограничивают применение электронных ламп в качестве пробразователей и детекторов на указанных выше ультравысоких частотах. Поэтому создание усилителя высокой частоты для сантиметрового диапазона представляет определенную трудность.

В силу этих-то трудностей инженерам и пришлось обратиться к кристаллическому детектору.

Так как коэффициент усиления такого детектора меньше единицы, то мощность приходящего сигнала в кристаллическом преобразователе ослабляется, однако при этом уровень его собственных шумов настолько мал, что оказывается более выгодным устранить вносимое ослабление после-

дующим усилением, чем применять ламповые преобразователи.

По конструкции кристаллические преобразователи представляют собой обычные кристаллические детекторы. Преобразовательные свойства кристаллических детекторов ухудшаются с ростом подводимого напряжения и тока через кристалл.

Характеристика кристаллического детектора напоминает характеристику диода, однако имеет и отрицательную часть, определяемую конечной величиной обратной проводимости кристаллической пары, которая увеличивается с ростом подводимого напряжения. Предельное напряжение на кристалле около 4—5 *в*, выше которого, как правило, наступает пробой.

Как уже было сказано, качество преобразователя определяется уровнем собственных шумов детектора. Наряду с сигналом они усиливаются по всему тракту, ограничивая тем самым возможность приема слабых сигналов. Однако в противоположность ламповым детекторам уровень шумов кристаллического детектора, определяемый беспорядочным тепловым движением электронов в кристалле, тем меньше, чем выше частота. Эта весьма благоприятная зависимость делает кристаллический преобразователь исключительно подходящим прибором для дециметрового и сантиметрового диапазонов.

Кроме хорошей шумовой характеристики, кристаллический детектор выгоден еще и потому, что он практически не требует источников питания и вследствие этого в ближайшем будущем, очевидно, сможет найти широкое применение в переносных радиоприемниках, ибо уже в настоящее время, например в некоторых типах переносных УКВ раций, в целях экономии источников питания применяют три кристаллических детектора, заменяющие три лампы и используемые в схемах 1-го и 2-го преобразователей и в схеме автоматической регулировки чувствительности (АРЧ).

Кроме основного своего использования в качестве преобразователя, кристаллический детектор современного типа находит широкое применение везде, где требуется выпрямить малые токи (до 30 *ма*) при напряжениях около нескольких вольт (схемы АРЧ, измерительные приборы разных типов, детекторы), а также в качестве модуляторов, низкочастотных генераторов и т. д.

Но все это стало возможным лишь после того, как был осознан механизм детектирования и был изучен механизм проводимости в полупроводниках и металлах.

Огромная заслуга в изучении этих явлений принадлежит нашим советским ученым, и в первую очередь акад. А. Ф. Иоффе, Ф. Ф. Волькенштейну и другим, посвятившим многие годы изучению свойств полупроводников.

МЕХАНИЗМ ПРОВОДИМОСТИ И ДЕТЕКТИРОВАНИЯ В КРИСТАЛЛАХ

Все тела, обладающие кристаллической структурой, могут быть разделены на три класса: проводники, полупроводники и диэлектрики. Из этих трех классов полупроводники представляют собой наиболее обширный класс кристаллов, ибо большинство тел, с которыми мы встречаемся в природе, является именно полупроводниками.

Кристаллы этих трех классов различаются, прежде всего, чисто количественным признаком—величиной электропроводности γ, диапазон изменений которой охватывает очень большой промежуток.

Так, например, мы имеем:

1. Для металлов $\gamma = 10^4 - 10^5$ *ом*$^{-1}\cdot$*см*$^{-1}$.
2. Для полупроводников $\gamma = 10^2 - 10^{-10}$ *ом*$^{-1}\cdot$*см*$^{-1}$.
3. Для диэлектриков $\gamma = 10^{-14} - 10^{-18}$ *ом*$^{-1}\cdot$*см*$^{-1}$.

Как видим, к классу полупроводников принадлежат кристаллы с весьма разнообразными значениями γ, отличающимися по величине в миллионы раз.

Однако различие между металлами, полупроводниками и диэлектриками не только количественное, но и качественное, так как на воздействие одних и тех же физических факторов кристаллы этих трех различных классов реагируют по-разному. Полупроводники, занимая промежуточное положение между металлами и диэлектриками, в некоторых отношениях похожи на диэлектрики, но в то же время обладают рядом совершенно специфических свойств.

Характерной особенностью полупроводников является то, что все их электрические свойства чрезвычайно неустойчивы и резко зависят от внешних воздействий. Электропроводность их обнаруживает весьма острую чувствительность к различным факторам: примесям, температуре, электрическому полю и освещению. Под влиянием этих факторов величина электропроводности изменяется в чрезвычайно

широких пределах. Так, например, если проводимость металлического проводника сравнительно мало зависит от чистоты металла и температуры, то полупроводники весьма чувствительны к чистоте вещества и его температуре. Их сопротивление резко уменьшается с увеличением температуры. Например, в чистой закиси меди повышение температуры от 0 до 1 000° приводит к падению удельного сопротивления от 10^{10} до 0,1 *ом · см.* Добавление посторонних веществ в качестве примесей в металлах обычно приводит к падению электропроводности; в полупроводниках же даже незначительное количество примеси в миллионы раз увеличивает проводимость; закон Ома, точно выполняющийся в металлах при всех достижимых силах тока, в полупроводниках нарушается, так как проводимость их довольно сильно растет при увеличении приложенного электрического напряжения.

Весьма интересны и такие факты, как влияние света и рентгеновских лучей на величину проводимости полупроводников. Облучение светом или рентгеновыми лучами металлического проводника не сказывается на величине его проводимости; облучение же полупроводника значительно увеличивает его проводимость, а иногда и вообще служит необходимым условием для ее существования (явление внутреннего фотоэффекта).

Наконец, весьма своеобразные явления, происходящие в пограничном слое металл — полупроводник, обусловили значительное практическое применение полупроводниковых материалов в технике. На этой границе происходит выпрямление переменного тока и возникновение (при облучении ее светом) э. д. с. (твердые выпрямители и фотоэлементы с запорным слоем).

Вопросу выяснения механизма проводимости электрического тока в полупроводнике и выпрямлению на границе металл — полупроводник, как указывалось выше, уделялось очень много внимания, что привело в настоящее время к созданию более или менее удовлетворительной теории, которую мы и попытаемся изложить в последующих параграфах.

ЭНЕРГИЯ ЭЛЕКТРОНА В КРИСТАЛЛЕ

Как известно, электрический ток неразрывно связан с движением электрических зарядов — положительных или отрицательных.

Различают три вида проводимости: 1) электронную (носителями тока являются электроны); 2) ионную (носителями тока являются ионы того или иного знака); 3) смешанную (в создании электрического тока участвуют как электроны, так и ионы).

Типичными представителями интересующих нас электронных проводников являются в первую очередь металлы.

Каков же механизм проводимости в металлах и других материалах?

В конце 19 в. ученые выяснили, что атом, считавшийся до того времени наименьшей частицей вещества, по своей структуре также очень сложен и что он представляет собой систему, состоящую из положительно заряженного ядра и некоторого количества отрицательно заряженных электронов, обращающихся вокруг ядра. При этом число электронов в атоме таково, что их общий заряд равен заряду ядра, так что в общем атом представляется электрически нейтральным. Соответствующими методами удалось установить заряд и массу электрона.

Чрезвычайно интересным и важным является тот факт, что электроны всегда имеют одинаковый заряд и массу, независимо от вещества, из которого они получены. В настоящее время приняты следующие значения массы m и заряда e электрона:

$$m = 9{,}1066 \cdot 10^{-28}\ \textit{г};\ e = 4{,}8025 \cdot 10^{-10}\ \textit{эл. стат. ед.}$$

Вследствие того что электроны движутся вокруг ядра по различным замкнутым стационарным орбитам, размеры которых различны, они обладают различной величиной потенциальной и кинетической энергии. Наиболее удаленные от ядра орбиты занимают внешние, так называемые валентные, электроны. Силы, связывающие электроны с ядром, подчинены закону Кулона.

В такой картине атома сразу бросается в глаза необычайное сходство с планетной системой, подобной нашей солнечной системе. Однако это сходство лишь кажущееся. В противоположность планетам, связанным между собой силами взаимного притяжения, электроны в атоме отталкиваются друг от друга. Кроме того, атомы обладают исключительной устойчивостью, не свойственной планетным системам. Однако такую характерную устойчивость электронной орбиты ученые длительное время не могли объяснить, пока на помощь не пришла теория квант.

Действительно, с точки зрения законов обычной электродинамики равномерное вращение электронов вокруг ядра должно сопровождаться возникновением волн, уносящих в окружающее пространство электромагнитную энергию. Единственным источником этой излучаемой атомом энергии может служить энергия электрона. Следовательно, скорость движения электрона вокруг ядра должна постепенно убывать, и электрон неизбежно должен в конце концов упасть на ядро. Однако в действительности этого не происходит.

В 1913 г. Бор предположил, что в каждом атоме существует ряд определенных состояний движения или стационарных состояний, в которых атом может существовать без излучения энергии. Изменение энергии атома должно сопровождаться процессом, во время которого атом переходит полностью из одного стационарного состояния в другое. Другими словами, изменение энергии электрона в атоме может происходить только таким образом, что электрон при увеличении или уменьшении ее должен обязательно перейти на другую орбиту, причем этот переход должен произойти не постепенно, а скачкообразно.

Далее предполагалось, что если переход из одного стационарного состояния в другое сопровождается излучением или поглощением электромагнитных волн, то частота этих волн вполне определенна и зависит от величины изменения энергии атома.

Таким образом, если электрон падает с одной орбиты на другую, лежащую ближе к ядру атома, то потерянная атомом энергия переходит в один квант лучистой энергии, испускаемой атомом в этот момент, т. е.

$$E_n - E_{n-1} = h\nu = \varepsilon,$$

где E_n — энергия электрона на n-ой орбите;
E_{n-1} — энергия электрона на n—1-ой орбите;
ε — энергия кванта;
ν — частота излучаемых колебаний;
h — постоянная Планка, равная $6{,}624 \cdot 10^{-27}$ эрг. сек.

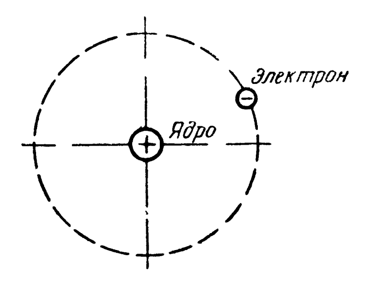
В соответствии с этим излучение и поглощение энергии всегда происходит целыми квантами.

В простейшем атоме — атоме водорода, схематически представленном на фиг. 1, имеется только сила притяжения к ядру F, прямо пропорциональная произведению заря-

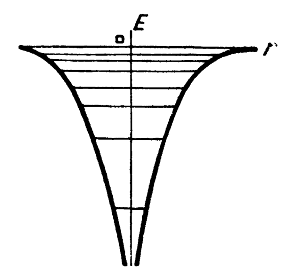
дов e протона (положительного ядра) и электрона и обратно пропорциональная квадрату расстояния r от ядра

$$F = \frac{e^2}{r^2}.$$

Для того чтобы вырвать электрон из атома, необходимо затратить довольно значительную энергию, порядка нескольких электрон-вольт. Напомним, что электрон-вольт — это та кинетическая энергия, которую электрон приобретает при движении в электрическом поле с разностью потенциалов в 1 *в*, причем 1 *эл.-в* $= 1{,}6 \cdot 10^{-12}$ эрг.



Фиг. 1. Схематическая модель атома водорода.



Фиг. 2. Энергетическая схема атома водорода.

Энергетическая схема свободного атома представлена на фиг. 2.

На этом рисунке показана характерная кривая для кулонова взаимодействия электрона и атомного ядра. Здесь по оси абсцисс отложено расстояние электрона от ядра, а по оси ординат — значения потенциальной энергии E. Верхняя горизонтальная прямая соответствует нулю энергии, т. е. бесконечно большому расстоянию между электроном и ядром; значения потенциальной энергии, как отрицательные, отложены вниз от этого нулевого уровня энергии.

Как видно из фиг. 2, уровни энергии электрона в атоме сходятся к некоторому пределу. На рисунке такой предел, соответствующий энергии отрыва электрона, представлен осью абсцисс or.

Выше предельного уровня электрон оторван от ядра и свободен в своем движении. Очевидно, что отрыв электрона (ионизация) произойдет, если он перейдет с уровня, соответствующего нормальному расстоянию электрона от ядра, на уровень, соответствующий отрыву, т. е. если будет затрачена некоторая энергия, которую мы обозначим буквой φ.

СТРОЕНИЕ ЭЛЕКТРОННЫХ ОБОЛОЧЕК АТОМОВ И МОЛЕКУЛ

Как же расположены электроны в сложном атоме? В том же 1913 г. Бор предположил, что атом по своему строению сходен с солнечной системой: электроны движутся в нем по определенным круговым и эллиптическим орбитам вокруг ядра, подобно планетам, движущимся вокруг солнца. Однако в настоящее время пришлось отказаться от приписания электрону в атоме определенной траектории движения. Мы не можем сейчас обрисовать точную картину траекторий электрона. Можно лишь сказать, что электрон обращается вокруг ядра, вращаясь в то же время в ту или другую сторону вокруг собственной оси.

Однако для удобства изложения мы примем допустимое для наших целей условие, что обращение электронов вокруг ядра происходит лишь по круговым орбитам (хотя это и не вполне точно). На основании этого допущения рассмотрим электронное строение атомов различных элементов.

Уже на ранних стадиях развития химии была обнаружена некоторая периодичность в изменении свойств элементов при расположении их по атомным весам. Периодичность свойств послужила основой периодической системы элементов Менделеева, которая имела огромное влияние на работу по изучению строения атома; и, обратно, с развитием современных представлений о строении атома периодическая система получила свое новое и полное истолкование.

Как уже указывалось, каждый атом состоит из центрального ядра, окруженного электронами. Основное различие между атомами элементов заключается в числе электронов, обращающихся вокруг ядра с зарядом $+Ze$ (где Z—порядковый номер элемента) по орбитам, напоминающим орбиты планет. Но энергии орбитальных электронов в атомах, в отличие от энергии планет, ограничены определенными дискретными значениями. Для планеты возможно движение по любой эллиптической орбите, имеющей в одном из своих фокусов солнце, тогда как в атоме лишь немногие орбиты являются «дозволенными», т. е. стационарными.

Поскольку каждой орбите соответствует вполне определенная энергия, электрон в атоме может обладать лишь некоторыми определенными значениями энергии. Эта дискретность энергетических состояний характерна для атомных систем.

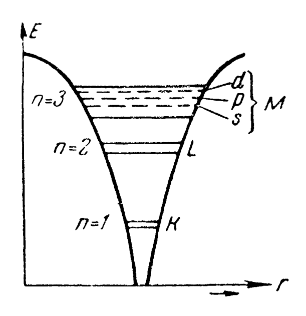
На основании исследования спектров различных элементов удалось выяснить, что в сложных атомах электроны,

окружающие ядро, разделяются на отдельные электронные слои, которые принято обозначать буквами K, L, M и т. д.

Ближе всех к ядру расположен слой K; следующие слои все более и более удалены от ядра.

Слой, к которому принадлежит электрон, характеризуется главным квантовым числом n.

Главное квантовое число $n = 1$ соответствует ближайшему к ядру слою K. Этот слой содержит у всякого атома только два электрона (за исключением атома водорода, имеющего всего один электрон). Главное квантовое число $n = 2$ соответствует второму слою L, в котором у подавляющего большинства атомов содержится 8 электронов. Третьему слою M, содержащему 18 электронов, соответствует $n=3$; для слоя N значение n равно 4 и т. д.



Фиг. 3. Схема распределения потенциальной энергии в атоме.

Принадлежность электрона к тому или иному слою может служить для грубой оценки энергии этого электрона по отношению к ядру. Электроны, входящие в состав внешних слоев, обладают большей энергией, чем электроны, принадлежащие внутренним слоям (фиг. 3).

Однако для точной характеристики энергии электронов недостаточно одного указания слоя, к которому эти электроны принадлежат; главное квантовое число еще не вполне определяет энергию электрона; точно энергетический уровень электрона определяется совокупностью нескольких квантовых чисел.

Для более точного определения положения электрона внутри электронного слоя необходимо различать подгруппы. Число подгрупп в каждом слое равно главному квантовому числу, характеризующему данный слой: так, слой K ($n=1$) состоит всего из одной подгруппы; следующий слой L ($n = 2$) состоит из двух подгрупп, слой M ($n = 3$) — из трех подгрупп и т. д.

Номера подгрупп принято обозначать буквами, например: 1-я подгруппа s, 2-я подгруппа p и т. д.

Подгруппы, принадлежащие различным слоям (а также и соответствующие им энергетические уровни), обозначают, указывая перед буквенным символом подгруппы значение

главного квантового числа, определяющего электронный слой, а затем номера подгруппы. Например: выражение $1s$ указывает, что речь идет о подгруппе s первой (K) оболочки, а символ $3p$ определяет подгруппу p третьей (M) оболочки.

Число электронов в каждой группе не может превышать некоторой величины, определяемой совокупностью номера группы (слоя) и номера подгруппы внутри слоя. Каждая же первая подгруппа в любом слое максимально может состоять из двух электронов; каждая вторая подгруппа — из 6 электронов; каждая третья — из 10; четвертая — из 14. Поскольку первый слой состоит из одной подгруппы, то число электронов в первом слое K, как уже упоминалось, не может превышать двух. Число электронов в слое L, состоящем из двух подгрупп, не может превышать $2+6$, т. е. 8. В слое M, состоящем из трех подгрупп, число электронов не может превышать $2+6+10$, т. е. 18, и т. д.

Указанное насыщение подгрупп и слоев является следствием того факта, что на одном энергетическом уровне, т. е. на одной электронной орбите, не могут находиться одновременно два электрона с одинаковыми квантовыми числами. Это правило носит название принципа или запрета Паули.

Рассмотрим теперь последовательность заполнения электронами уровней в элементах, расположенных в ряд по возрастающим атомным номерам в периодической системе. Водород — первый элемент — обладает одним электроном, который занимает самый нижний уровень $1s$. У гелия два электрона; оба они находятся на $1s$-уровне. Если бы этот уровень мог содержать более чем два электрона, литий имел бы три $1s$ электронов. В действительности, однако, только два электрона могут находиться в $1s$-состоянии, и поэтому третий электрон лития вынужден располагаться на уровне с большей энергией. Действительно, он занимает самый нижний уровень $2s$. Инертность гелия связана с тем фактом, что оба его электрона занимают полностью $1s$-уровень, далеко отстоящий от группы уровней $2s$ и $2p$. Заполненную группу уровней, отделенную промежутком от других групп, называют обычно замкнутой оболочкой.

Когда мы доходим до неона (у которого заполнены оба уровня — $2s$ и $2p$), перед нами снова — благородный газ. Следующий элемент — натрий — имеет так же, как и литий, один электрон вне замкнутой оболочки. Этот факт тесно связан со сходством химических свойств этих двух элементов.

Имеется взаимно однозначное соответствие между рядом элементов от магния до аргона, в котором заполнены уровни $3s$ и $3p$. Элемент калий, следующий за аргоном, является снова щелочным металлом и т. д. и т. п.

Действие междуатомных сил сказывается больше всего на электронах, занимающих самые внешние орбиты, так как эти электроны расположены дальше других от ядра их собственного атома, которое поэтому действует на них с меньшей силой. Исследования показывают, что близость других атомов практически не изменяет орбит электронов, принадлежащих замкнутым оболочкам.

Электроны, которые находятся вне замкнутых оболочек, участвуют в химических реакциях, вследствие чего они могут быть названы валентными электронами. Это, вообще говоря, те электроны, которые металлы одалживают при соединении с неметаллами, а именно таким элементам, как галогены, кислород, селен, азот и фосфор. При соединении с металлами неметаллические элементы занимают у них электроны и заполняют свои свободные уровни.

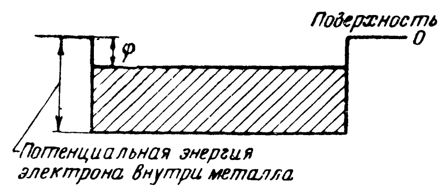
Как только их незаконченные оболочки оказываются заполненными, они становятся насыщенными в том смысле, что строение их орбит сходно с таковыми у благородных газов. Так, галоген (например, фтор), имеющий на один электрон меньше, чем это требуется для заполнения $2p$-уровня, становится устойчивым, как только приобретает еще один электрон. Соответственно, кислород становится устойчивым после приобретения двух электронов. Мы видим, что обычная валентность неметаллов определяется числом электронов, требуемых для заполнения оболочки.

ПРОВОДИМОСТЬ МЕТАЛЛОВ И ПОЛУПРОВОДНИКОВ

Еще в начале 20 в. было высказано предположение, что высокую электропроводность металлов можно объяснить, допуская, что их валентные электроны свободны и движутся в металле подобно атомам газов. Это предположение было сохранено при всех последующих видоизменениях теории. И в настоящее время его можно считать верным, по крайней мере качественно.

При обсуждении теории электропроводности металлов нужно иметь в виду следующее. Поскольку электроны обычно не покидают металл, хотя свободно перемещаются внутри него, мы можем предположить, что вблизи поверхности металла существуют силы, их удерживающие. Это озна-

чает с энергетической точки зрения, что электроны в металле обладают меньшей потенциальной энергией, чем вне его. Если потенциальную энергию снаружи принять равной нулю, то внутри металла потенциальная энергия равна φ, где φ есть положительная величина, равная работе выхода. Таким образом, работа выхода есть та энергия, которую необходимо затратить для того, чтобы, преодолевая силу притяжения положительных ионов, вырвать электрон из металла, не сообщая ему скорости. Это положение может быть схематически представлено так, как это сделано на фиг. 4. Ломаная линия изображает изменение потенциальной энергии электрона, которое происходит, хотя и не столь резко, как на рисунке, но не более, чем на протяжении нескольких междуатомных расстояний, так что в большинстве практических случаев можно считать, что на границе металла имеет место скачок потенциальной энергии. Вследствие тепловых флуктуаций не все электроны будут обладать одинаковой энергией. Следовательно, при любой температуре существует определенная вероятность того, что данный электрон будет обладать достаточной кинетической энергией для того, чтобы преодолеть поверхностный барьер и покинуть металл. Естественно, что вероятность такого события растет с повышением температуры (термоэлектронная эмиссия). Если работа выхода для некоторого металла велика, то соответственно велика и сила притяжения электронов металлом.



Фиг. 4. Энергетическая схема атома металла.

Два металла с различными работами выхода в вакууме (φ_1 и φ_2) будут обладать друг относительно друга разностью потенциалов, причем металл с большей работой выхода будет заряжен отрицательно относительно второго металла. Эта разность потенциалов называется контактной разностью потенциалов K и равняется отрицательной разности работ выхода: $K = -(\varphi_2 - \varphi_1)$.

Дальнейшее развитие теории проводимости происходило на принципах волновой механики.

В текущем столетии рядом ученых была выдвинута теория, что электрон, который всегда рассматривали как про-

стую частицу, должен обладать определенными волновыми свойствами. Из этой теории вытекало следующее соотношение между длиной волны, связанной с электроном, и скоростью его:

$$mv = h/\lambda,$$

где m — масса электрона;
h — постоянная Планка;
v — скорость электрона;
λ — длина связанной с электроном волны.

Однако часто оказывается более удобным заменить длину волны обратной величиной k, называемой волновым числом, так как оно выражает число длин волн, укладывающихся в единице длины. В этом случае уравнение принимает следующий вид:

$$mv = hk.$$

Считая, что кинетическая энергия совершенно свободного электрона выражается соотношением $E = \frac{mv^2}{2}$, мы получим формулу, связывающую энергию с волновым числом:

$$E = \frac{h^2}{2m} k^2.$$

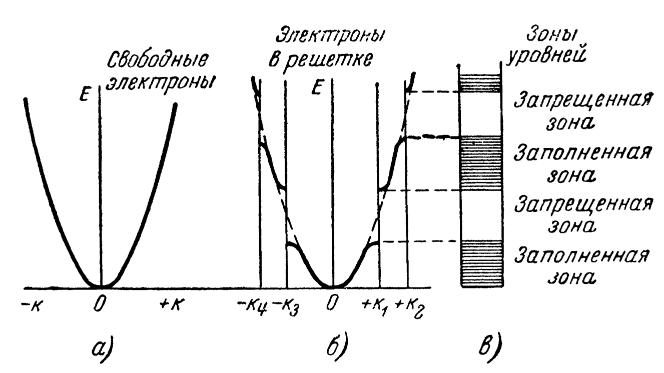
Кривая энергии для такого (свободного от какого бы то ни было поля) электрона в зависимости от волнового числа представлена на фиг. 5,*а*. Поскольку свободный электрон может иметь любую волну, без каких-либо ограничений, то мы видим, что кривая, характеризующая его кинетическую энергию, имеет вид параболы.

В действительности же, электронное строение рассматриваемых нами веществ представляет собой сложную систему, которая и предопределяет в значительной степени энергию и поведение электрона в этой системе.

Действительно, в кристаллической решетке твердого тела потенциальное поле, в котором движется данный электрон, не однородно, а является сложной функцией положения электрона. Оно зависит не только от того, каким образом расположены атомы, но также и от того, как движутся все остальные электроны. В этом случае энергия электрона E уже не будет пропорциональна k^2, как в однородном поле, а будет зависеть от конфигурации поля и величины k. Вследствие этого она будет иметь форму, показанную на

фиг. 5,*б*. Из этого рисунка видно, что при определенных значениях k энергия электрона имеет разрывы, и некоторые области энергии оказываются запрещенными для электрона, если его волновое число k имеет соответствующую величину.

Если разрывы велики и не перекрываются ни при каких внешних воздействиях, то тогда существуют области энергии, запрещенные для электронов, движущихся по любому направлению, и в этом случае схемы уровней энергии будут



Фиг. 5. Зависимость энергии электрона от волнового числа.

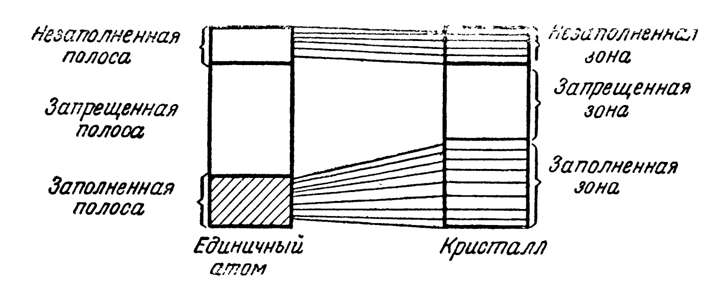
иметь вид, наглядно изображенный на фиг. 5,*б* или 5,*в*. Как видно из этих рисунков, возможные уровни (заштрихованные участки) состоят из полос уровней энергии, разделенных запрещенными областями. Существование областей значений энергии, в которых нет дозволенных состояний движения, является общим свойством атомных систем.

Переходя от единичного атома к системе электронов кристалла, надо отметить, что когда большое число таких молекул конденсируется в твердое тело, то под влиянием взаимных электрических полей энергия внешних валентных уровней атомов и молекул значительно изменяется. При этом взаимодействие между молекулами настолько сильно, что все тело приходится рассматривать как единую систему. Идентичные прежде уровни отдельных атомов теперь получают несколько различные значения, и теперь уже во всей системе не должно быть больше электронов, занимающих один и тот же квантовый уровень.

Так как принцип Паули справедлив не только для одноатомной системы, но и для сложной системы, то очевидно,

что в решетке, образованной из n одинаковых атомов, все n электронов, находившихся ранее на одинаковом уровне, не могут занимать один и тот же уровень, и поэтому уровни энергии расщепляются в полосы.

В случае n атомов один уровень энергии расщепляется на n энергетических уровней, расположенных в непосредственной близости друг от друга (фиг. 6). Вместо каждого уровня молекулы появляется полоса из n уровней кристалла. Для внешних электронов оказывается, что по мере увеличения энергии электронов полосы становятся шире, а расположенные между ними запрещенные зоны сужаются. Та-



Фиг. 6. Схема расщепления уровней энергии.

ким образом, если внутренние электроны K- и L-уровней, находящиеся под преобладающим действием своего атомного ядра, и можно связывать с данным атомом, то валентные электроны не локализованы, а являются коллективом всей кристаллической решетки и связаны с системой уровней всего кристалла.

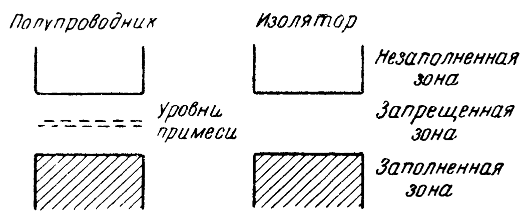
Все внешние электроны, таким образом, можно считать свободными в том смысле, что они не связаны с данным атомом. Но их свобода связана запрещением переходить на занятые уже двумя другими электронами уровни. Однако они все же могут перейти на другой уровень (при воздействии на них температуры, электрического поля и т. д.), если окажется, что этот уровень не заполнен.

Из этого следует, что если все полосы заняты полностью и электроны не могут перейти в другую полосу, то электропроводность отсутствует, ибо хотя перемещение электронов в полностью занятой полосе и может осуществляться, но происходит это только путем взаимного обмена электронов своими местами. Однако при таком обмене переноса тока

не наблюдается, и в этом случае мы имеем дело с непроводником.

Иначе ведут себя вещества, у которых верхняя энергетическая полоса не заполнена, а полоса, расположенная непосредственно под верхней, полностью занята. Если на энергетической схеме расстояние между этими полосами равно (по порядку величины) тепловой энергии kT, то возможны отдельные переходы электронов из заполненной полосы в незаполненную. Такие вещества являются полупроводниками.

Если же расстояние между зонами дозволенных значений энергии велико по сравнению с kT, то такие вещества являются изоляторами.



Фиг. 7. Энергетические схемы полупроводника и изолятора

Для того чтобы вещество обладало металлической проводимостью, необходимо, чтобы верхняя полоса уровней была заполнена лишь частично. Такую неполностью занятую полосу принято называть полосой проводимости.

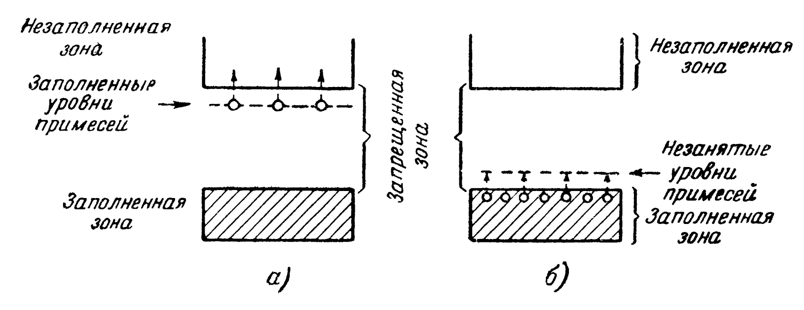
В веществах, не имеющих структуры металла, электроны при определенных условиях все же могут проводить электрический ток. Для того чтобы выяснить эти условия, рассмотрим не только полосу, происшедшую от расщепления определенного квантового уровня в атоме, а всю совокупность возможных энергетических уровней тела.

На фиг. 7 в вертикальном направлении нанесены энергии электронов полупроводника и изолятора.

Над первой, заполненной, полосой имеется следующая полоса с более высокой энергией. Электрические свойства данного тела определяются, как указывалось выше, тем, насколько широка запрещенная зона, разделяющая обе полосы энергии, т. е. область энергии, запрещенная квантовыми законами. Если электрону удается перескочить через запрещенную зону и попасть в следующую полосу, то в ней

имеется много свободных уровней; здесь электрон становится свободным. Отсюда можно объяснить свойства полупроводников, если предположить, что самая верхняя заполненная зона отделена от самой нижней свободной зоны запрещенной областью, но запрещенная область содержит небольшое число дополнительных уровней. Если идеальный кристалл не обладает уровнями такого типа, то они могут быть в кристаллах с дефектами кристаллической решетки или с посторонними атомами.

Мы можем, таким образом, определить полупроводники как материалы, которым свойственны загрязнения или не-



Фиг. 8. Энергетические уровни полупроводников.

совершенства решетки и которые обладают дополнительными энергетическими уровнями в запрещенной области, созданными этими примесями или дефектами структуры.

Удобной схемой энергетических уровней полупроводника является поэтому фиг. 7, где по оси ординат отложены значения энергии, а по оси абсцисс — положения в пространстве. Все зоны изображены на этой диаграмме непрерывно простирающимися вправо и влево, соответственно тому, что находящиеся на них электроны могут перемещаться по всей решетке; дополнительные уровни в запрещенной области изображены пунктирными линиями, расположенными в месте нахождения примеси или дефекта, с которым связан данный уровень.

Обычно рассматривают два типа полупроводников. Энергетическая схема для полупроводника первого типа изображена на фиг. 8,*а*, где имеются занятые уровни примесей, лежащие очень близко от «дна» свободной (незаполненной) зоны. Находящиеся на этих уровнях электроны могут, в результате нагревания вещества, быть переведены в зону

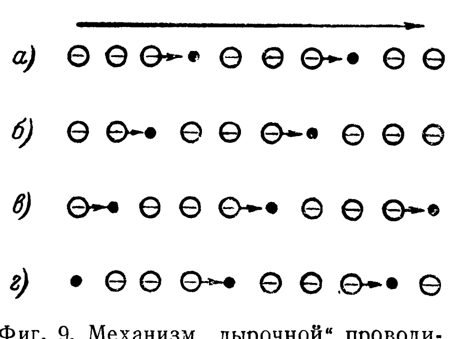
проводимости при значительно более низкой температуре, чем электроны, принадлежащие заполненной области. Такая картина имеет место у соединений металла с кислородом, которые вследствие химического восстановления, например путем прокаливания их в атмосфере водорода, выделяют избыточные атомы металла. Благодаря этому соединения, которые первоначально являлись непроводниками, получают свойства полупроводников. Так, например, если подвергнуть восстановлению окись цинка (кристаллы из ионов цинка и кислорода), то часть атомов кислорода удалится из твердого тела, оставив равное число нейтральных атомов цинка, которые диффундируют в кристаллическую решетку. Валентные электроны этих единичных атомов располагаются в энергетическом уровне непосредственно под нижней линией незаполненной зоны. Такой тип полупроводника называется избыточным электронным полупроводником или полупроводником типа n.

В качестве технически важных избыточных полупроводников следует отметить наряду с ZnO, WO_3 и Fe_2O_3 прежде всего TiO_2 и UO_2, которые хорошо известны как урдокс-сопротивления. Эти металло-кислородные соединения отнюдь не являются единственными полупроводниками типа n. Не менее значительную роль в настоящее время играют также германий и кремний, если в последних имеются следы сурьмы, мышьяка или фосфора.

Схема энергетических уровней полупроводника второго типа изображена на фиг. 8,*б*. Как видно, здесь имеются свободные дополнительные уровни, расположенные вблизи верхней границы занятой (заполненной) зоны. При нагревании такого вещества электроны могут переходить с уровней заполненной зоны основной решетки на свободные уровни примеси, создавая при этом «дырки» в заполненной зоне и нарушая таким образом в ней статистический баланс электронов, благодаря которому электроны не могли участвовать в проводимости. Такая группа полупроводников появляется, если те же соединения металлов обработать не путем восстановления, а путем окисления. Возникшие теперь незаполненные места, или «дырки», могут перемещаться, а вместе с этим могут перемещаться и электроны, попадающие на их места. В этом случае говорят о недостаточной или дырочной, проводимости (или проводимости типа p).

Действительно, появление свободных мест среди основных уровней изменяет условия для занимающих их электро-

нов. Пока все уровни были заполнены, невозможны были изменения в движении электронов. Но освободившиеся места открывают эту возможность. Положим, что электрические силы поля действуют на отрицательные электроны слева направо (фиг. 9). Тогда освободившиеся от электронов места (фиг. 9,*а*) будут преимущественно замещаться пришедшими слева, а вновь освобожденное при таком переходе место, прежде занимавшееся ушедшим электроном, окажется слева от прежнего свободного места (фиг. 9,*б*,*в*,*г*). Другими словами, свободные места будут перемещаться преимущественно справа налево, т. е. в направлении, в котором должны были бы двигаться положительные заряды. Свободные места среди нормальных уровней двигаются в электрическом поле так, как если бы они представляли собой подвижные положительные заряды.



Фиг. 9. Механизм „дырочной" проводимости.

Для техники в качестве полупроводников типа р имеют значение главным образом CuO, CoO и UO_2 (последнее соединение допускает обработку как путем восстановления, так и путем окисления, в зависимости от чего получается избыточный или недостаточный полупроводник).

Германий и кремний с примесями бора или алюминия также являются полупроводниками типа р.

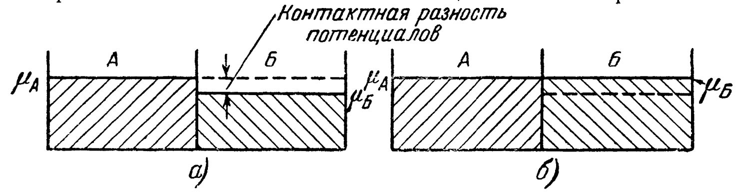
К какому типу относится тот или другой полупроводник, является ли он избыточным или недостаточным, можно установить путем измерения постоянной Холла, на способах определения которой в данной брошюре мы останавливаться не будем. В общем имеет силу следующее правило: загрязнения вещества атомами большей валентности путем создания избытка атомов металла приводят к образованию избыточных полупроводников; соединения с загрязнениями элементами меньшей валентности, если создается недостаток атомов металла, наоборот, становятся недостаточными полупроводниками.

Соединения средней валентности, как, например, UO_2, могут быть использованы либо для изготовления полупроводников типа n, либо полупроводников типа p.

Аналогичное положение с германием и кремнием, которые по своей валентности принадлежат к 4-й группе периодической системы элементов. В случае загрязнения их элементами 3-й группы они превращаются в полупроводники типа p, если же они загрязнены элементами из 5-й группы, то они превращаются в полупроводники типа *n*.

КОНТАКТНОЕ РАВНОВЕСИЕ И КОНТАКТНОЕ ВЫПРЯМЛЕНИЕ

Свойства контактов и контактных выпрямителей могут быть изучены при помощи того простого принципа, что при установившемся состоянии поток электронов через границу раздела (контакта) в одном направлении должен быть равен по величине потоку обратного направления.



Фиг. 10. Изменение потенциальной схемы металлов при соприкосновении

Очевидно, если имеются два металла *А* и *Б* с работами выхода $\varphi_А$ и $\varphi_Б$ (причем $\varphi_А < \varphi_Б$), то при их сближении электроны наибольшей энергии в *А* энергетически лежат выше самых быстрых электронов в *Б* как раз на величину разности между работами выхода (фиг. 10,*а*). Когда контакт осуществился, то электроны текут от *А* к *Б*, пока энергии наиболее высоких уровней в обоих металлах не сравняются между собой (фиг. 10,*б*).

Примерно такая же картина получается в случае контакта между металлом и полупроводником или между металлом и изолятором. В том и в другом случаях в конце концов устанавливается равновесное состояние, однако время этого процесса будет значительно бóльшим.

Ознакомившись с контактным равновесием, перейдем теперь к рассмотрению механизма контактного выпрямле-

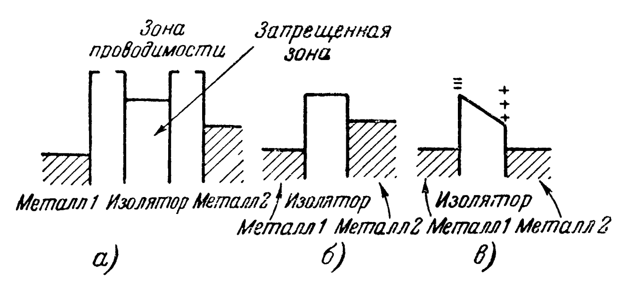
ния. Для этого обозначим работу выхода для металла символом $\varphi_м$, а полупроводника — через $\varphi_{пп}$.

Если теперь металл и полупроводник соприкасаются и их краевые энергетические уровни μ, соответствующие наиболее высоким энергиям, находятся на одинаковой высоте при различной величине работы выхода (фиг. 10), то в промежутке между ними должна наблюдаться разность потенциалов, определяемая различием их потенциалов выхода. Это различие в потенциалах выхода $\varphi_м - \varphi_{пп}$ обозначается в виде контактного потенциала K и является решающим фактором для возникновения выпрямляющего эффекта.

Согласно современным воззрениям процесс детектирования в кристаллических детекторах происходит не в месте соприкосновения металла с полупроводником, а в полупроводнике на некотором (порядка нескольких сот атомных диаметров) расстоянии от металла. При этом в полупроводнике образуется потенциальный или запирающий барьер. Детектирование происходит вследствие асимметрии этого барьера относительно приложенного напряжения. Последние исследования А. Ф. Иоффе и А. М. Губанова показывают, что асимметрия потенциального барьера оказывается наибольшей в том случае, если по обе стороны потенциального барьера образовываются полупроводники с различными носителями тока. Однако, не забегая вперед, мы рассмотрим сначала систему контакта, образованную из двух металлов с различными работами выхода, в которой теоретически, при определенных условиях, возможно образование потенциального слоя. При таких условиях подобный контакт также должен детектировать. Так как происходящий при таких условиях процесс гораздо проще, чем в случае контакта металла с полупроводником, то он и будет рассмотрен нами в первую очередь.

Допустим, что мы имеем два не соприкасающиеся между собой металла с различными работами выхода, между которыми помещается тонкая перегородка из изолятора кристаллической структуры с заполненными и незаполненными электронными зонами (распределение потенциальных энергий для всех трех составляющих элементов показано на фиг. 11,*а*). При соприкосновении металлов с изолятором распределение потенциальных энергий изменится (фиг. 11,*б*). При этом электроны металла *2* начнут двигаться к металлу *1*, так как граница распределения Ферми металла *1* ниже,

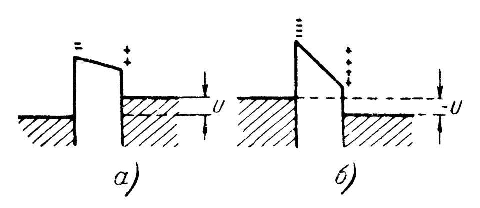
чем металла *2*. Движение электронов будет продолжаться до тех пор, пока на поверхностях соприкасающихся металлов не появится двойной слой заряда. Этот заряд вызывает снижение энергетических уровней электронов металла *2* относительно уровней другого металла и приводит в конечном счете к уравниванию верхних границ распределения



Фиг. 11. Образование детектирующего барьера между двумя металлами.

Ферми обоих металлов. При достижении состояния равновесия движение электронов полностью прекращается (фиг. 11,*в*).

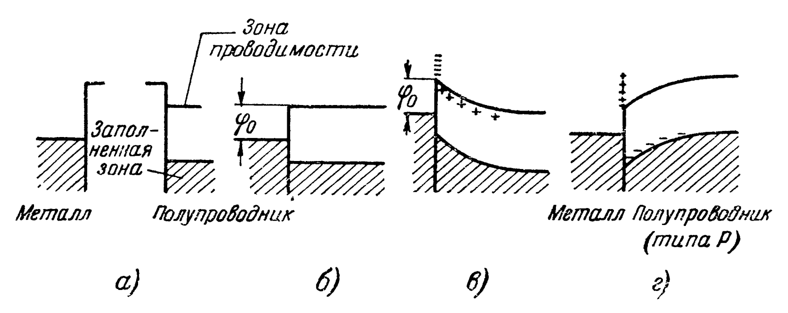
Однако это состояние снова нарушается, если к рассмотренной системе подвести внешнее напряжение U (по величине меньше разности работ выхода). На фиг. 12,*а* показан случай, когда к системе приложено напряжение в таком (прямом) направлении, что электрические уровни электронов металла *2* повышаются относительно уровней электронов металла *1*. Противоположный случай, когда внешнее напряжение действует в обратном направлении, показан на фиг. 12,*б*. Очевидно, что высота потенциального барьера в том и другом случаях остается неизменной, если смотреть на него со стороны металла *1*. Однако, если на барьер смотреть со стороны металла *2*, то высота его с ростом напряжения будет линейно возрастать. Таким образом, мы видим, что если приложенное напряжение приводит



Фиг. 12. Схема детектирования в контакте металл — металл.

к повышению энергетических уровней металла 2 (имеющего меньшую работу выхода) относительно уровней металла 1, т. е. когда металл 1 становится анодом, а металл 2 — катодом, то результирующие токи начинают увеличиваться, и проводимость контактной пары возрастает.

Этот наглядный пример позволяет нам представить себе в простой схематической форме основные принципиальные процессы, объясняющие явление детектирования.



Фиг. 13. Образование детектирующего слоя между металлом и полупроводником.

Перейдем теперь к случаю контакта металл — полупроводник.

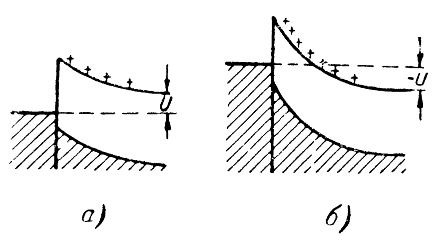
На фигуре 13,*а* представлены соотношения энергетических уровней для полупроводника типа п и металла, еще не пришедших в соприкосновение. Картина, соответствующая моменту соприкосновения, но до установления равновесия, представлена на фиг. 13,*б*. Но, как мы уже видели, такое состояние не может продолжаться долго, и из полупроводника в металл начинают двигаться электроны, создавая на его поверхности поверхностный отрицательный заряд некоторой плотности. У поверхности полупроводника появляется равный положительный заряд, распределенный вдоль слоя толщиной *Д*. Источником этого заряда в полупроводнике служат ионизированные частицы примеси.

Появление двойного слоя приводит к тому, что все энергетические уровни электронов в массе полупроводника понижаются на величину разности работ выхода металла и полупроводника. Схематическое распределение потенциальной энергии для этого случая приведено на фиг. 13,*в*.

Очевидно, что под действием двойного слоя нижняя граница зоны проводимости в полупроводнике снижается по-

чти до уровня верхней границы распределения Ферми в металле. Между металлом и массой полупроводника находится барьерный слой, высота которого определяется контактной разностью потенциалов, а ширина равна, примерно, $1{,}2 \cdot 10^{-6}$ *см*.

Для примесного полупроводника типа p положение почти такое же. Окончательное распределение потенциальной энергии для этого случая приведено на фиг. 13,*г*. Здесь барьер задерживает поток дырок, и двойной слой характеризуется зарядами противоположных знаков. Детектирование здесь происходит почти так же, как и в рассмотренном выше случае барьерного слоя между двумя металлами с различными работами выхода.



Фиг. 14. Схема детектирования в контакте металл—полупроводник.

Распределение потенциала, изображенное на фиг. 14,*а*, характерно для случая, когда к барьерному слою между полупроводником и металлом приложено напряжение в пропускном (прямом) направлении, т. е. для случая, когда электроны протекают легче. Если смотреть на контакт со стороны металла, то здесь высота потенциального барьера задается контакной разностью потенциалов, и поэтому число подвижных электронов, протекающих через запорный слой в направлении от металла к полупроводнику, постоянно и не зависит от приложенного к контакту напряжения. Наоборот, уровни электронов в полупроводнике увеличились на величину, определяемую величиной приложенного напряжения U. Поэтому, если смотреть на контакт со стороны полупроводника, то высота потенциального барьера снизилась благодаря уменьшению объемного заряда в барьере перешедшими в него электронами.

Фиг. 14,*б* представляет распределение потенциала в контакте, к которому приложено напряжение в задерживающем (обратном) направлении. В этом случае высота потенциального барьера и поток электронов в направлении от металла к полупроводнику не изменились от действия напряжения. Со стороны же полупроводника высота барьера увеличилась, отчего поток электронов от полупроводника

к металлу уменьшился. Таким образом, мы снова приходим к системе с односторонней проводимостью.

Однако подобное толкование выпрямляющего действия, впервые предложенное Б. И. Давыдовым, а затем вскоре и Шоттки, не всегда оказывалось в согласии с получающимися опытными данными.

Дальнейшие исследования выпрямителей привели к заключению, что эффект детектирования должен быть еще бóльшим, если в качестве пар, как указывалось выше, применить два полупроводника.

Действительно, экспериментальные исследования подтвердили это предположение. Оказалось, что если составить пару из двух полупроводников с разным знаком носителей тока, причем контактный потенциал дырочного выше контактного потенциала электронного (что обычно и имеет место), например $Cu_2O + TiO_2$, то отношение сопротивлений запорного направления к прямому достигало 10 000, в то время как в рассмотренной выше теории контакта металл—полупроводник это отношение должно достигать порядка 500—600*.

А. Ф. Иоффе при исследовании контактных выпрямителей пришел к выводу, что на указанный эффект детектирования должно накладываться еще одно явление, заключающееся в изменении толщины запорного слоя в зависимости от направления приложенного тока. Он утверждает, что электрическое поле, создаваемое двумя телами, благодаря разности их контактных потенциалов проникает в глубь полупроводников и создает в пограничных слоях объемные заряды того или иного знака в зависимости от знака разности контактных потенциалов. В тех случаях, когда контактное поле удаляет из поверхностных слоев подвижные заряды, образуются слои резко повышенного удельного сопротивления.

Образованный в отсутствие тока запирающий слой при наличии тока изменяет свою толщину — уменьшается в прямом направлении и утолщается в обратном.

Допустим, что имеются электронный и дырочный полупроводники в контакте друг с другом, причем контактный потенциал дырочного полупроводника выше электронного.

---

* Физические основы теории такого выпрямителя изложены в статье А. И. Губанова „Теория контакта двух полупроводников с различным типом проводимости“ (ЖТФ, XX, 1287, 1950).

В такой паре из-за разности контактных потенциалов соприкасающихся поверхностей должны образоваться слои, обедненные зарядами, с повышенным сопротивлением. Толщина их зависит от удельных сопротивлений полупроводников ρ, как $\sqrt{\rho}$.

Если в такой паре полупроводников создать электрическое поле, то главное падение потенциала окажется на слоях с повышенным сопротивлением. В зависимости от знака приложенного напряжения сопротивление будет меняться различно. При положительном напряжении на дырочном полупроводнике дырки в дырочном полупроводнике и электроны в электронном увлекаются полем к контакту полупроводников, где и рекомбинируют, поддерживая в системе некоторый определенный ток. С ростом приложенного напряжения толщина слоя будет уменьшаться. Сопротивление слоя будет падать по двум причинам: во-первых, из-за уменьшения его толщины, во-вторых, из-за повышения проводимости слоя под действием сильного поля. Благодаря наложению этих двух явлений сопротивление слоев будет быстро падать с ростом напряжения, чем и объясняется резкий загиб характеристики уже при небольших величинах положительных потенциалов.

Если теперь изменить (обратить) знак приложенного потенциала, т. е. к дырочному полупроводнику приложить отрицательный потенциал, а к электронному — положительный, то в этом случае как дырки, так и электроны будут отсасываться от плоскости контакта, и концентрация их вблизи контакта будет уменьшаться; в результате приконтактный слой очень скоро настолько обеднеет, что ток сильно упадет. Толщина слоев будет расти с возрастанием напряжения; эффект сильного поля будет сказываться поэтому все слабее — это направление тока будет запорным.

Таким образом, мы приходим к требуемому результату: при одной и той же разности потенциалов ток через контакт в одном и другом направлениях резко различен.

Итак, в нашем распоряжении имеются две теории, рассматривающие образование потенциального барьера и изменение толщины запорного слоя в зависимости от величины и направления приложенного напряжения, которые, однако, не только не противоречат друг другу, а наоборот, дополняют и расширяют одна другую, расширяя тем самым наши познания о механизме детектирования.

КРИСТАЛЛИЧЕСКИЕ ДЕТЕКТОРЫ

Ввиду того что ламповые преобразователи частоты, которые применялись ранее, являлись дополнительными источниками шумов, уровень которых повышался с частотой, было обращено большое внимание на кристаллические выпрямители как на возможную замену радиоламп. В связи с этим были проведены значительные работы по освоению их изготовления и испытанию.

Работы проводились с самыми различными материалами и элементами. В результате этих исследований как наиболее пригодные для изготовления кристаллических детекторов были отобраны кремний и германий.

Для кремниевых детекторов в качестве исходного материала первоначально брался технический 98%-ный кремний, который в больших масштабах применяется в литейном деле. При этом детектирование хотя и получалось удовлетворительным, однако продолжало еще желать много лучшего.

Позднее брался более чистый кремний и к нему добавлялись в качестве присадок алюминий и бор. В результате был создан детектор весьма устойчивый к пережогу и с высокой чувствительностью. По устойчивости и долговечности он мог конкурировать с электронной лампой.

Дальнейшее улучшение шло либо по линии специальной обработки поверхности кристалла (для облегчения нахождения на ней наилучшей точки), либо по линии уменьшения контактной поверхности (для уменьшения емкости) и, наконец, по линии увеличения устойчивости к пережогам и к изменениям внешних воздействий.

В процессе исследований германия было установлено, что присадка даже небольшого количества олова к германию позволяет резко увеличить обратное напряжение (до 100 *в*) при одновременном уменьшении падения напряжения в прямом направлении. Такой детектор обладает рядом достоинств: он имеет высокое сопротивление в обратном направлении (от 10 000 *ом* до 1 *мгом*) при напряжениях до 50 *в*, высокую проводимость в прямом направлении (по сравнению с диодом) и резким перегибом характеристики уже при нескольких десятых вольта, малую емкость (0,5 *мкмкф*) и малый размер (порядка 2—3 *см*).

Сходные электрические результаты можно получить и с кремниевыми детекторами, пользуясь в качестве присадок оловом, висмутом или германием.

ТЕХНОЛОГИЯ КРИСТАЛЛА

Приготовление заготовки кристалла. При изготовлении кристалла детектора приходится проделать следующие операции: очистку полупроводника, введение строго определенного количества присадок, приготовление отливки, нарезку и подготовку пластинок (полировка, термическая обработка и травление).

Поскольку выпрямляющие свойства полупроводника зависят даже от незначительных количеств примесей, то первый этап производства детекторов начинается именно с очистки полупроводника.

Так как практически для детекторов, как уже указывалось, нашли техническое применение пока лишь кремний и германий, то в дальнейшем мы и будем рассматривать только эти два полупроводника.

При изготовлении кристаллов можно наметить три следующие метода:

1. Применение естественных кристаллов, например пирита.
2. Применение металлургических методов для изготовления кремния или германия с необходимыми присадками.
3. Применение метода высаживания кристаллического слоя кремния на графитовые основания из газовой среды.

Для промышленности метод отбора естественных кристаллов нехорош из-за трудности контролирования, а также по той причине, что естественные кристаллы значительно хуже искусственных в механическом и электрическом отношениях. Поэтому в настоящее время в промышленных детекторах, как правило, применяются искусственные кристаллы.

Распространенный метод очистки кремния до очень высокой степени чистоты (99,9%) представляет собой процесс восстановления цинком четыреххлористого кремния. Реакция при этом идет при температуре 950°, т. е. значительно ниже точки плавления кремния (1 440°), но значительно выше точки кипения цинка (905°), хлористого цинка и четыреххлористого кремния. Хлористый цинк, получающийся в процессе реакции, и избыток цинка или четыреххлористого кремния улетучиваются в виде паров. Кремний же оседает в нижней части реактора в форме игольчатых кристаллов.

Четыреххлористый кремний и цинк берутся наиболее чистые по своему составу и по возможности свободные от примесей.

Одна операция в реакторе в виде кварцевой трубы длиной 120 и диаметром 20 *см* занимает 24 часа и дает выход около 3 *кг*.

Полученный кремний промывается соляной кислотой и затем дистиллированной водой.

Другой способ заключается в том, что технический кремний (98%) размельчается до весьма мелкого порошка. Затем берется навеска порядка 750 *г* такого порошка и заливается водой с добавкой соляной кислоты.

После того как пройдет первая бурная реакция, добавляют избыток соляной кислоты с добавкой азотной кислоты. Смесь эта выдерживается в течение 24 час. После этого осадок фильтруется и тщательно промывается дистиллированной водой. Порошок помещают в платиновую чашку и добавляют 1 *л* дистиллированной воды.

К полученной смеси медленно добавляют около 300 $см^3$ 40%-ной плавиковой кислоты, после чего смесь нагревают около 4 час. и снова добавляют серную и плавиковую кислоты примерно в такой же пропорции. Затем смесь кислот испаряется, остаток тщательно промывается дистиллированной водой, фильтруется и снова обрабатывается 700 $см^3$ концентрированной плавиковой кислоты для удаления последних следов окиси кремния и оставляется отстаиваться в течение 12 час. После этого осадок фильтруется, тщательно моется и сушится.

Для получения хороших выпрямительных характеристик в полупроводник вводятся в незначительных количествах различные присадки. В качестве таких присадок для кремния наибольшее применение нашли алюминий, бор и бериллий. При этом получаются кристаллы с проводимостью p-типа. Все эти присадки вводятся в тщательно размельченном состоянии и тщательно перемешиваются. Оптимальное количество примесей обычно находится экспериментально и колеблется в незначительных пределах; так, например, некоторые предприятия получают удовлетворительные результаты при добавлении в кремний 0,4% алюминия и 0,1% бериллия; другие — 0,2% алюминия и 0,025% бора.

Метод осаждения кристаллов из газовой среды производится также из четыреххлористого кремния, который достаточно просто получить в чистом виде из ряда продуктов.

Температура в печи при осаждении кремния около 750°. Процесс осаждения продолжается от 4 до 6 час., после чего кварцевая печь выключается, ее содержимое охлаждает-

ся и вынимается из кварцевой трубы, через которую в присутствии алюминия прогонялся четыреххлористый кремний. На стенках кварцевой трубы и помещенных в этой зоне предметах, в частности графитовых штабиках, выделяется осажденный слой кристаллического кремния, толщина которого зависит от разных условий, и в особенности от длительности процесса.

Оптимальная толщина слоя в этом случае около 40 микрон.

Установлено, что в осажденном кремнии имеется примесь алюминия в количестве порядка сотых или десятых долей процента. При этом хорошие кристаллы имеют обычно не более 0,2% и не менее 0,04% алюминия.

Методика, применяющаяся различными предприятиями для восстановления германия из окиси, в общем одинакова.

Восстановление осуществляется в кварцевой печи, через которую во все время восстановительного периода непрерывно прогоняется водород. Температура печи поддерживается в течение первых трех часов около 650° и в последующие 45—50 мин. 850°. Во время нагрева скорость подачи водорода составляет около 5 *л/сек*. При этом процессе окись германия восстанавливается до германия.

Обычным способом практической проверки чистоты германия является измерение сопротивления отдельных образцов, взятых из различных частей отливки, приготовленной из чистого германия. Сопротивление, как правило, возрастает с возрастанием чистоты образца. Установлено, что для целей изготовления выпрямителей вполне пригоден германий с удельным сопротивлением от 5 до 40 *ом · см*.

При восстановлении германия из четыреххлористого германия в атмосфере, свободной от кислорода, в качестве восстановителя используются пары цинка.

Этот способ подобен способу, которым получается чистый кремний из четыреххлористого кремния.

Температура в реакторе во время процесса равна 930°, т. е. находится примерно посредине между точкой кипения цинка и точкой плавления германия. Германий при этом способе, как правило, образует сплав с цинком. Продукт, добытый из реактора, может содержать до 40% цинка. Большая часть остатка цинка может быть удалена, если продолжать подогрев реактора и пропускать через него, после того как реакция уже закончена, инертный газ. Затем этот материал подвергают обработке соляной кислотой

до тех пор, пока химическая реакция не будет закончена. Некоторое количество цинка, которое все же остается, может быть удалено плавкой в вакууме. После обработки соляной кислотой германий обрабатывается в течение 4 час. концентрированной кипящей плавиковой кислотой, для того чтобы устранить следы окиси кремния (кремнезема). После этого продукт моют и сушат.

Было сделано большое число опытов по выяснению влияния различных примесей на выпрямительные характеристики германиевых кристаллов. В частности, были исследованы влияния фосфора, ванадия, мышьяка, ниобия, олова, висмута, никеля и других элементов.

Германий с этими элементами дает n-тип полупроводника, который имеет хорошие вольтамперные характеристики на постоянном токе. Однако испытания на высокой частоте ($\lambda = 10$ *см*) показали, что кристаллы с этими присадками обладают большими потерями и большими шумами. Поэтому наиболее употребительной присадкой является олово.

Обработка кристалла. Кристаллы, применяемые в выпрямителях, — это пластинки, отрезанные от заготовки, полученной, как указано выше, сплавлением и рекристаллизацией смеси из чистого полупроводника и соответствующего количества определенной примеси.

Хорошая отливка должна быть плотной и не должна иметь трещин и надломов. Она должна быть однородной по своим физическим и электрическим свойствам.

Некоторые предприятия при изготовлении кремниевых отливок применяют плавку в индукционной печи в атмосфере гелия. Охлаждение отливки осуществляется медленным извлечением плавки из индукционной обмотки.

Сама печь представляет собой кварцевую трубу диаметром 10 *см*. Труба соединена с металлической головкой, через которую она заряжается. В головке имеются наблюдательное окно и два патрубка для входа и выхода гелия, который пропускается через нагреватель во время реакции. Температура в сосуде при помощи индукционной печи доводится до температуры плавления кремния (1 600°), после чего сосуд медленно, со скоростью 3 *мм/мин*, извлекается из печи. Отливки, полученные описанным выше способом, получаются плотные и совершенно без трещин.

Однако неравномерное прогревание отливки приводит к тому, что структура отливки неодинакова по всей толще,

и поэтому из всей отливки удается использовать в дело лишь около половины всего куска.

Процесс дальнейшего приготовления полупроводника, следующий за приготовлением отливки, заключается в контролируемом процессе полировки, термообработки и травления.

Получившаяся отливка с помощью медного диска, на торцевой части, по периферии которого нанесен слой алмазной пыли, разрезается на пластинки толщиной 1 *мм*. Остающиеся следы алмазной пыли устраняются при шлифовке, производимой на шлифовальном станке мокрым способом с водой и карборундом.

После предварительной шлифовки та сторона пластинки, которая будет использована для выпрямительного контакта, подвергается полировке. Для того чтобы пластинку было удобнее держать во время полировки, ее с помощью целлулоидного цемента прикрепляют к куску меди. Полировка производится сухим способом на наждачной бумаге № 000 на полировальном станке при скорости вращения 600 об/мин. Полировка продолжается на стальной пластинке со смесью легкого машинного масла и керосина. Наждачная бумага в процессе полировки вбирает масло, и пластинка становится сухой. Операция полировки обычно требует 10—15 мин. В результате этой операции поверхность пластинки становится зеркальной. На поверхности при таком способе не остается никаких признаков кристаллической структуры.

После полировки масло удаляется отмывкой пластинки в дихлорэтане. Целлулоидный цемент устраняется погружением пластинки в горячую концентрированную серную кислоту, после чего пластинка промывается в дистиллированной воде.

После того как пластинка отполирована и очищена, она обрабатывается термически. Для этого ее в течение, примерно, около получаса нагревают в атмосфере воздуха при температуре 900—950° и охлаждают. Слой окиси, образующийся при этом на поверхности пластинки, удаляется выдерживанием пластинки в 24%-ной плавиковой кислоте в течение 0,5 мин. Как показали опыты, атмосфера, в которой ведется отжиг (воздух, водород, гелий, кислород, азот и др.), существенного значения не имеют.

Следующий этап обработки поверхности пластинки — это электролитическое покрытие задней поверхности, с тем

чтобы пластинку можно было припаять к латунному стержню при сборке детектора. Удовлетворительным является метод, заключающийся в нанесении на заднюю поверхность никелевого покрытия. Для этого неполированная сторона пластинки промывается смесью из 10% (по весу) концентрированной азотной кислоты и 90% 48%-ной плавиковой кислоты. Крепость этого раствора выбирается с тем, чтобы поверхностная реакция протекала очень медленно, пока все более и более явно не станет выявляться зернистая структура поверхности. Если реакция идет слишком энергично или слишком медленно, то на поверхности кремния образуется темносиний поверхностный слой, который подвергается в дальнейшем электролизу. Хорошие результаты получаются, если остановить процесс, когда вся поверхность покроется мелкими пузырьками.

Для получения хорошего приставания никеля пластинку нужно тщательно промыть и никелировать, пока она еще не высохла. Пластинка укрепляется в специальных тисках бакелитовыми зажимами, устроенными таким образом, чтобы неполированная сторона пластинки никелировалась, а полированная не соприкасалась с поверхностью электролита. Электрический контакт дается на полированную поверхность пластинки.

Получение хорошего никелевого слоя на задней поверхности пластинки очень важно. Плохой контакт между основанием и кристаллом в детекторе может повысить уровень шумов и вызвать неустойчивость характеристики.

После никелировки пластинку тщательно моют и сушат. Затем ее кладут на ровный кусок плотного картона и с помощью лезвия ножа колют на кусочки соответствующего размера для припайки к основанию детектора. Пластинка легко колется по граням кристаллов и при этом мало теряется материала. Пластинку можно, конечно, резать и на маленькие квадратики при помощи алмазной пилы, но при этом получается большой отход материала.

Далее кристаллики припаиваются к стойке или винту детектора. Так как из-за малых размеров паять кристалл очень трудно, то пайка производится при зажиме латунной стойки и кристалла в маленькие тиски. Кристалл припаивается мягким припоем с применением специального флюса.

Перед самой сборкой детектора кристалл подвергают окончательному травлению. Латунную стойку (обычно золоченую или платинированную), на которой смонтирован

кристалл, помещают на платиновую пластинку и погружают в 48%-ную плавиковую кислоту на 5—10 сек. После этого стерженек с напаянным кристаллом тщательно промывается в дистиллированной воде, после чего он готов к сборке.

Приготовление германиевого кристалла в общем сходно с приготовлением кремниевого кристалла. Отливки из германия режутся на пластинки толщиной 0,5 *мм*. Затем пластинка подвергается шлифовке на стекле с алундовым порошком и водой. После шлифовки пластинка режется на маленькие пластиночки 2×2×0,5 *мм*.

Перед тем как резать пластинку на такие квадратики, одну сторону покрывают родием. Затем пластинки напаивают на латунные платинированные стерженьки. Стерженьки с напаянными кристаллами зажимают в специальные зажимы по 20 шт. сразу и полируют на полировальном круге мокрым способом.

Сначала полируют на камне, чтобы создать ровную поверхность; затем обрабатывают на полотне алундом и окисью магния до зеркального блеска.

Термическая обработка, которая применялась при обработке кремния, здесь оказывается неподходящей. Опыт показывает, что нагрев в атмосфере воздуха и последующее травление для снятия слоя окиси приводят к тому, что получается характеристика почти короткого замыкания; поэтому германиевые кристаллы монтируются без термической обработки.

ТЕХНОЛОГИЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ИГЛ

Требования, предъявлемые к металлу иглы со стороны его электрических и механических свойств, многочисленны. Это, прежде всего, должен быть твердый металл, который при давлении, необходимом для хорошего выпрямления, не расплющивался бы; он должен хорошо пружинить для предотвращения повреждений при ударах. Масса иглы должна быть мала, а упругость, теплопроводность и электропроводность должны быть велики. Материал должен, не становясь пластичным, вытягиваться в тонкую проволоку, которую можно гнуть и которой можно придавать нужную форму.

Как указывалось выше, величина работы выхода — это одна из величин, от которой зависит барьер на границе металл — полупроводник. Для получения хорошего выпрямления необходимо, чтобы работа выхода из металла была

меньше, чем из дырочного полупроводника, и, наоборот, больше, чем у полупроводника электронного типа. Кроме того, высота этого барьера в полупроводнике зависит от разницы между работой выхода из металла и полупроводника. Таким образом, казалось бы, что, зная полупроводник и зная работы выхода металлов и их механические свойства, можно было бы заранее выбрать необходимый материал для иглы. Однако практически вследствие наличия в полупроводниках весьма различных и малых по количеству примесей, резко изменяющих свойства полупроводников, выбор необходимого металла представляет значительные трудности. Поэтому контактирующий с полупроводником металл, как правило, подбирается экспериментальным путем. Наиболее употребительные контакты для кремния — это сплав молибдена с вольфрамом, нерасслаивающийся вольфрам, и фосфористая бронза.

Можно использовать в качестве материала для игл также сплав платины и рутения, что обеспечивает в паре с германием изготовление детекторов с более высоким обратным напряжением. Рутений в количестве 10% необходим для увеличения твердости платиновой иглы.

Толщина проволочки и размер иглы определяются, в основном, той силой, которая нужна в точке контакта. Для 10-сантиметрового диапазона, например, где желательны относительно большие поверхности контакта, берется проволока диаметром порядка 0,2 *мм*. На более высоких частотах диаметр проволоки берется еще меньше, вплоть до 0,05 *мм*.

Процесс обработки иглы перед ее установкой заключает в себе заточку иглы на конус, придание ей надлежащей формы и запайку ее в иглодержатель.

Заправка конуса может быть осуществлена или механической шлифовкой на камне, или электролитической обработкой.

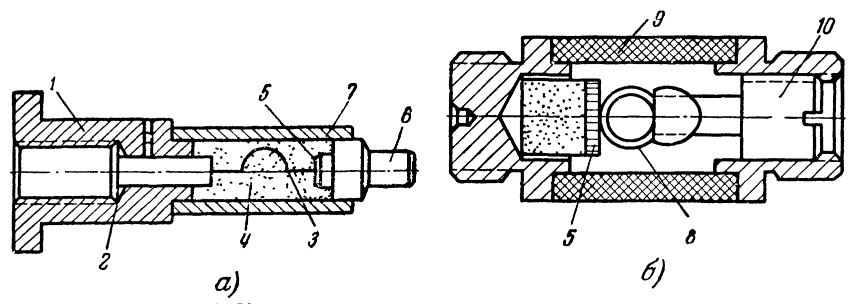
При механической обработке проволока держится перед шлифовальным кругом под определенным углом. Внутренний угол конуса равен приблизительно 70—80°. Получившийся диаметр острия конуса (0,0025 *мм*) очень мал, однако площадь контакта будет значительно больше вследствие расплющивания кончика при надавливании на поверхность кремния.

Контроль за процессом заточки иглы обычно осуществляется с помощью проекционного микроскопа.

В результате механической шлифовки на поверхности острия иногда остаются следы обработки, а иногда заусенцы.

При электролитической обработке острия заусенцы не появляются. Такая обработка дает более надлежащую форму острия и гладкую поверхность.

Процесс электролитической обработки заключается в том, что концы иглы погружаются в качестве анода в электролит, состоящий из 25% (по весу) раствора едкого калия. В качестве катода применяется медная сетка. Про-



Фиг. 15. Конструкции кристаллических детекторов.

1 — основание контактное; *2* — иглодержатель; *3* — вольфрамовая игла; *4* — заполняющая масса; *5* — кристалл; *6* — штепсельный контакт (кристаллодержатель); *7* — керамический патрон; *8* — петля; *9* — корпус; *10* — регулировочный винт.

цесс полировки заключается в том, что к электродам приключается напряжение порядка 0,8 *в* на 2 сек., а затем еще два раза около 2 *в* на 0,2 сек. После описанной электрополировки усики промываются в струе горячей воды и сушатся.

После того как игла изготовлена, она запаивается при помощи легкоплавкого сплава в ниппель (иглодержатель) и изгибается таким образом, чтобы были обеспечены необходимые упругость и контактное давление.

Одна из распространенных конструкций детектора с такой иглой представлена на фиг. 15,*а*.

В некоторых конструкциях вместо острой иглы пользуются металлической петлей (фиг. 15,*б*). Для петлевых детекторов 10-сантиметрового диапазона лучший выход получается с петлей, изготовленной из проволоки диаметром 0,1 *мм*, а для 3-сантиметрового диапазона — диаметром 0,05 *мм*. Более тонкие петли механически недостаточно устойчивы.

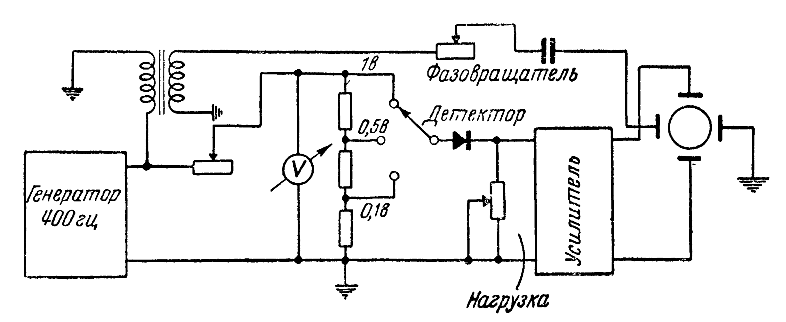
Вопреки некоторым мнениям следует отметить, что материал петли играет очень большую роль. Как правило, для высокоомных кристаллов лучшие результаты дают молибден и 50%-ный сплав ниобия с танталом. Для низкоомных кристаллов лучшие результаты получаются с вольфрамом, танталом и золоченым (с тонким в 2—3 микрона слоем) вольфрамом или молибденом.

При прочих равных условиях для видео- и измерительных детекторов лучшие результаты дают молибден, для смесительных — вольфрам и тантал.

Ниппель с запаянной в него иглой вставляется в контактное основание и зажимается винтом. Само же контактное основание впаивается в керамическую трубочку, с противоположного конца которой вставлен и запаян кристалл (фиг. 15).

НАСТРОЙКА ДЕТЕКТОРА

После того как детектор будет собран, необходимо произвести его настройку. Один из методов настройки детекторов заключается в том, что детектор подключается к характерографу, и при помощи регулировочного винта давление в контакте подбирается таким образом, чтобы характе-



Фиг. 16. Принципиальная схема характерографа.

ристика имела наиболее ярко выраженный униполярный характер.

Характерограф представляет собой прибор, принципиальная схема которого представлена на фиг. 16, а работа осуществляется следующим образом.

Генератор 400 *гц* питает, с одной стороны, горизонтальные пластины осциллографа через повышающий трансфор-

матор и фазовращатель, служащий для сдвига характеристики на экране; с другой стороны, генератор питает низкоомный делитель напряжения, с которого напряжение подается на детектор и последовательно с ним включенное сопротивление нагрузки порядка 30 *ом*. Напряжение на пластины вертикального отклонения осциллографа подается с сопротивления нагрузки через усилитель.

При снятии характеристики и регулировке единичных образцов, конечно, нет необходимости делать такой прибор. В этом случае снять характеристику можно на постоянном токе, постепенно меняя подаваемое на детектор напряжение и замеряя выпрямленный ток гальванометром.

После того как детектор полностью настроен, он заливается специальной массой, которая не позволяет игле сдвигаться с выбранной точки во время изменения температуры и при механических сотрясениях или ударах.

В некоторых случаях, чтобы сделать детектор еще стабильнее, практикуется приваривание иглы к германиевому кристаллу посредством кратковременного пропускания через контакт в прямом направлении тока порядка 250 *ма*.

ПРИМЕНЕНИЕ ДЕТЕКТОРОВ

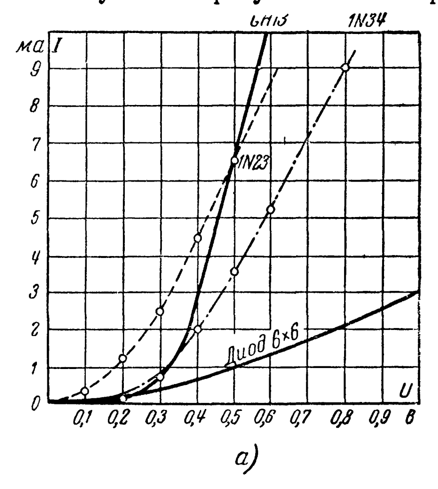
Рассмотрев процесс детектирования и технологию изготовления детекторов, обратимся теперь к их характеристикам и к использованию их в схемах.

Электрические свойства детекторов прежде всего характеризуются их вольтамперной характеристикой.

Наиболее простой и распространенный вид характеристики детектора — это статическая вольтамперная характеристика, из которой можно заключить, насколько велико обратное сопротивление, какова электропроводность в прямом направлении и насколько резко нарастает кривизна характеристики в начале координат. Знание каждого из этих параметров совершенно необходимо для оценки качества детектора, так как чем выше будет обратное сопротивление, тем выше будет эффект детектирования; от того, какова величина электропроводности в той или иной схеме, от того, насколько резко нарастает крутизна характеристики в начале координат, будет зависеть минимальная величина выпрямляемого сигнала, т. е. «чувствительность» детектора.

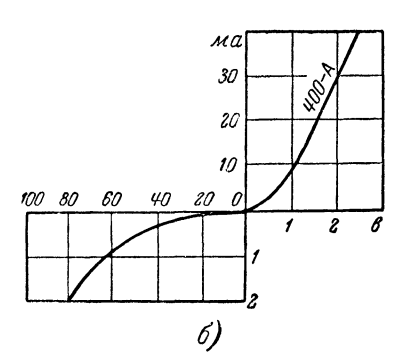
Статическая характеристика может быть снята на постоянном токе или на переменном токе с помощью характе-

рографа, описание которого было приведено выше. Частота колебаний характерографа обычно выбирается в пределах, не превышающих нескольких тысяч герц, так как в противном случае на результаты измерений будут накладываться искажения, определяемые шунтирующим эффектом емкости между кристаллом и иглой.

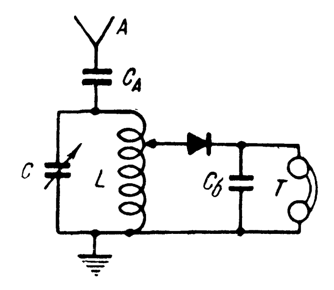


Типичные характеристики кристаллических детекторов с кремниевыми и германиевыми кристаллами приведены на фиг. 17,*б*. Для сравнения на фиг. 17,*а* приведена характеристика лампового диода типа 6Х6.

Из фиг. 17,*б* видно, что характеристика детектора при напряжениях до +0,5 *в* изменяется по криволинейному закону. При напряжениях выше



Фиг. 17. Вольтамперные характеристики детекторов.



Фиг. 18. Принципиальная схема детекторного приемника.

0,5 *в* эта характеристика становится линейной и имеет наибольшую крутизну.

Вольтамперная характеристика позволяет определить возможное применение детектора в качестве выпрямителя, смесителя и т. д.

В качестве простейших и известных примеров возможного применения рассмотрим использование детекторов для выпрямления высокочастотных колебаний в детекторном приемнике и для преобразования частот в супергетеродинных приемных устройствах.

Детектор в детекторном приемнике. Наиболее простая схема детекторного приемника приведена на фиг. 18. Здесь T — телефонные трубки с сопротивлением порядка 1 000 *ом*; $Д$ — детектор; C, L — колебательный контур; A — антенна; $C_б$ — блокировочный конденсатор.

Каким же электрическим требованиям должен удовлетворять применяемый детектор?

Прежде всего, он должен иметь по возможности наибольший к. п. д., который зависит от сопротивления детектора. Мощность выпрямленного тока, отдаваемая детектором в нагрузку, будет равна:

$$P_н = I_0^2 \cdot R_н,$$

где I_0 — выпрямленный ток, а $R_н$ — сопротивление нагрузки (в нашем случае $R_н = 1\,000$ *ом*). Мощность же $P_д$, бесполезно теряемая на сопротивлении детектора $R_д$, определяется соотношением

$$P_д = \frac{U_д^2}{R_д},$$

где $U_д$ — напряжение сигнала на зажимах детектора,
а $R_д$ — сопротивление детектора переменному току высокой частоты.

Отношение этих мощностей при данной схеме равно

$$\eta = \frac{P_н}{P_д} = I_0^2 \cdot R_н \frac{R_д}{U_д^2}.$$

Рассматривая полученное соотношение почленно, мы видим, что $I_0^2 \cdot R_н$ представляет собой коэффициент, характеризующий схему; отношение же $\frac{R_д}{U_д^2}$ представляет собой характеристику детектора, из которой легко определить, что полезная мощность детектора будет тем больше, чем меньшее напряжение падает на детекторе и чем больше

его сопротивление переменному току. Вместе с тем мы знаем, что наибольшая отдача мощности генератором в нагрузку будет в том случае, когда сопротивление генератора равно сопротивлению нагрузки. Поэтому сопротивление детектора, который для нагрузки в виде телефонных трубок может рассматриваться как генератор постоянного тока, не может быть взято каким угодно, а лишь равным сопротивлению нагрузки (в нашем случае 1 000 *ом*).

Не менее важно согласование детектора и с высокочастотным контуром, являющимся для детектора генератором высокой частоты. В этом случае условие согласованности определяется тем же равенством сопротивления детектора переменному току и эквивалентного сопротивления генератора.

Практически для наилучшего согласования сопротивления детектора (определяемого методом замещения) с внутренним сопротивлением генератора приходится цепь детектора связывать с контуром автотрансформаторно, т. е. так, как это показано на фиг. 18, и, изменяя положение подвижного контакта, выбрать связь таким образом, чтобы

$$Z' = n^2 \cdot Z = R_{\partial},$$

где Z — эквивалентное сопротивление контура;
Z' — эквивалентное сопротивление участка контакт — заземление;
n — коэффициент трансформации.

Только при соблюдении этих соотношений мощность, выделяемая в нагрузке, будет наибольшей.

Кристаллический детектор-преобразователь частоты. Известно, что для преобразования частоты может быть использовано любое нелинейное сопротивление, на вход которого подаются две частоты f_1 и f_2. В результате нелинейности характеристики на выходе такого элемента, кроме основных частот, появляются комбинационные частоты, кратные целым числам n и m, так что:

$$f_{mn} = (n \cdot f_1 \pm m \cdot f_2).$$

В качестве нелинейного элемента преобразователя чачастоты в приемнике берется обычно многосеточный или диодный преобразователь. Как правило, в радиоприемных

устройствах контур промежуточной частоты настраивается на разность частот, т. е.

$$f_{пр} = f_{гет} - f_{сигн}.$$

На волнах же метрового и дециметрового диапазонов обычно используется гармоника частоты гетеродина, т. е.

$$f_{пр} = n \cdot f_{гет} - f_{сигн}.$$

Это вызвано тем, что при более низкой основной частоте конструкция гетеродина получается более простой и надежной.

Преобразователи частоты разделяются на два вида: 1) односеточные, когда напряжения сигнала и гетеродина подаются на один электрод, и 2) двухсеточные, когда напряжения сигнала и гетеродина подаются на два различных электрода.

При односеточном преобразовании используются обычные ламповые или кристаллические детекторы. В качестве двухсеточных преобразователей применяются специальные многосеточные лампы (гексод, октод и т. д.).

Применение той и другой схем имеет свои преимущества и свои недостатки. Так, если в многосеточных лампах напряжение каждой частоты может быть подано на различные сетки и разделение катушек весьма просто, то в диоде может быть использован лишь анод, что приводит к значительной связи между контурными катушками. Преимуществом диодных преобразователей является меньший уровень шумов.

Как известно, граница чувствительности приемника определяется входным сопротивлением и внутренними шумами ламп, входных катушек и антенны.

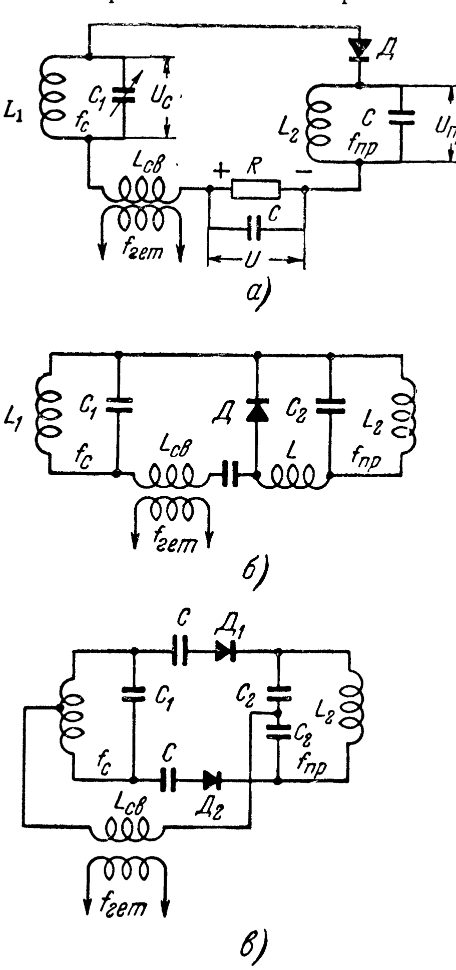
Входное сопротивление лампы прямо пропорционально квадрату длины волны, т. е.

$$R_{вх} = a\lambda^2,$$

где a — коэффициент, характеризующий входное сопротивление лампы, зависящее от длины волны.

Шум лампы, обусловленный внутренними флуктуациями электронов, также растет с увеличением частоты. Кроме того, как указывалось выше, в области дециметровых и сантиметровых волн время пробега электронов в лампе сравнимо с периодом колебаний сигнала. Все это приводит

к резкому снижению преобразования. Поэтому в области дециметровых и сантиметровых волн применяются, главным образом, диодные преобразователи, имеющие значительно меньшие уровни шумов.



Фиг. 19. Принципиальные схемы кристаллических смесителей.

Однако в сантиметровом диапазоне (при длине волны порядка нескольких сантиметров) ламповый диод также перестает нормально работать, и в этом случае целесообразно применение только кристаллического диода.

Кристаллический диод, как уже указывалось, имеет весьма малую емкость (менее 1 *мкмкф*) и меньшее время пролета электронов между электродами. Кроме того, кристаллический диод имеет меньшее внутреннее сопротивление, и поэтому потери на преобразование будут меньше. Из-за малого времени пролета электронов и малой емкости кристаллический диод можно использовать в качестве преобразователя до волн миллиметрового диапазона. Фактическая граница применения кристаллического преобразователя определяется лишь емкостью контакта и индуктивностью подводок.

Рассмотрим теперь несколько практических схем кристаллических преобразователей частоты.

На фиг. 19,*а* L_1, C_1, представляет собой контур, настроенный на частоту принимаемого сигнала f_c; $L_{св}$ — катушка связи с контуром вспомогательного гетеродина; *Д* — кристаллический детектор.

Промежуточная частота $f_{пр}$, получающаяся в результате преобразования частот гетеродина $f_{гет}$ и принимаемого сигнала f_c, выделяется контуром L_2 C. Сопротивление, шунтированное конденсатором C, служит для получения некоторого смещения, сдвигающего рабочую точку несколько правее — в область характеристики, имеющей большую крутизну.

На фиг. 19,*б* представлена другая схема кристаллического преобразователя. Схема эта, в общем, похожа на разобранную выше, отличаясь наличием настроенного на промежуточную частоту защитного контура L, C, уменьшающего связь контура L_1, C_1 с выходным контуром L_2, C_2 и контуром гетеродина. Для уменьшения падения напряжения на катушке связи последняя должна иметь по возможности малую индуктивность.

На фиг. 19, *в* приведена двухтактная схема преобразователя, отличающаяся большим коэффициентом преобразования.

КРИСТАДИН И ЕГО СВОЙСТВА

В 1922 году сотрудник Нижегородской лаборатории им. В. И. Ленина О. В. Лосев открыл возможность генерирования колебаний с помощью детекторного кристалла.

Этот прибор получил название кристадин и пользовался довольно значительное время вниманием как наших радиолюбителей, так и радиолюбителей за границей. Однако в дальнейшем, в связи с бурным развитием электровакуумной техники, кристадин был вытеснен электронными лампами и почти полностью забыт.

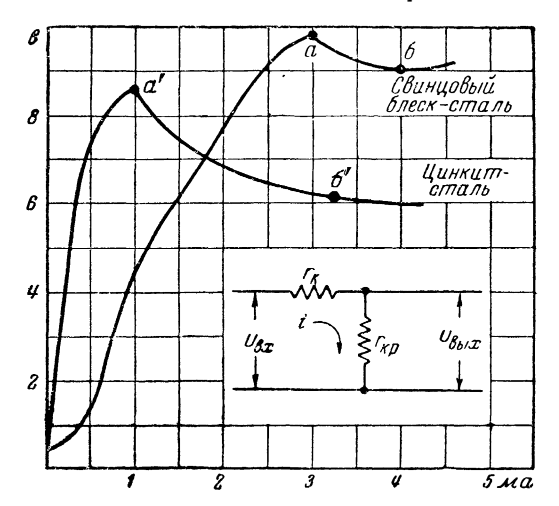
О. В. Лосевым было установлено, что генерация колебаний или усиление кристалическим детектором возможно только при наличии участка вольтамперной характеристики с отрицательным внутренним сопротивлением, которое определяется как:

$$r_к = -\frac{\Delta U}{\Delta I},$$

где $r_к$ — переходное сопротивление контакта.

В этом случае вольтамперная характеристика примет вид, изображенный на фиг. 20 (точки *а*, *б* и *а'*, *б'*).

Действительно, если рассмотреть схему измерения, приведенную на фиг. 20, то следует, что при изменении напря-



Фиг. 20. Вольтамперные характеристики генерирующих кристаллов.

жения всей цепи на величину ΔU на сопротивлении $r_{кр}$ (сопротивление толщи кристалла) напряжение будет падать:

$$\Delta U_1 = \Delta I \cdot r_{кр} = U_{вых},$$

а на сопротивлении $r_к + r_{кр}$:

$$\Delta U_2 = \Delta I \cdot (r_к + r_{кр}) = U_{вх},$$

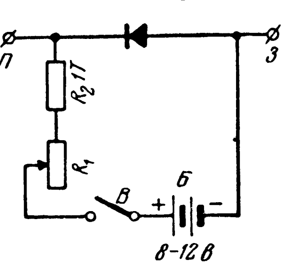
где ΔI — изменение тока i в зависимости от изменения напряжения на зажимах цепи ΔU.

Отсюда усиление по напряжению:

$$K = \frac{U_{вых}}{U_{вх}} = \frac{\Delta I \cdot r_{кр}}{\Delta I\,(r_к + r_{кр})} = \frac{r_{кр}}{r_к + r_{кр}}.$$

Положительное усиление ($K > 1$) возможно только при $r_к < 0$, т. е. на участке вольтамперной характеристики, имеющем отрицательный наклон. Степень усиления зависит от

$r_к$, т. е. от крутизны наклона отрицательного участка характеристики. О. В. Лосев показал, что отрицательный участок характеристики для кристаллов одного и того же химического состава сильно зависит от проводимости толщи кристалла. Малая проводимость толщи кристалла действует как последовательно включенное положительное сопротивление, и если его величина больше отрицательного сопротивления контакта, то участка с отрицательным наклоном не будет вообще. Из множества кристаллов и пар к ним, исследованных Лосевым, лучшими по крутизне оказались пары цинкит — уголь и цинкит — сталь. Применяя пару цинкит — сталь в кристаллическом усилителе, можно заметно повысить дальность и громкость приема на простом детекторном приемнике. Необходимо отметить, что такой усилитель с генерирующим кристаллом прост в изготовлении и не требует радиоламп и высоковольтных батарей. Единственным затруднением в изготовлении кристаллического усилителя может быть только приобретение и обработка кристалла цинкита (окись цинка). Однако такой усилитель можно сделать и с другим кристаллом, но в этих случаях значительно труднее найти генерирующую точку и, кроме того, усилители с другими кристаллами работают несколько хуже.



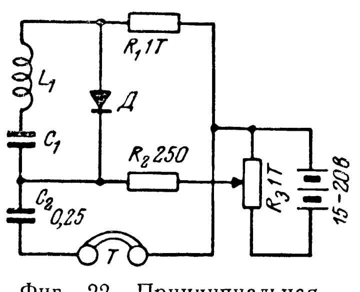
Фиг. 21. Принципиальная схема кристадинной приставки.

Кристаллический усилитель может быть конструктивно оформлен в виде отдельной приставки, которая монтируется в отдельной коробке. Такая кристадинная приставка подробно описывается Е. Н. Степановым в журнале «Радио», № 4 за 1949 г.

Схема этой приставки приведена на фиг. 21.

Экспериментатору, приступающему к работе с кристадином, следует начинать с подбора генерирующих кристаллов. Для этого следует собрать макет, схема которого изображена на фиг. 22. Парой к кристаллу желательно брать стальную проволочку в виде пружины диаметром 0,1 — 0,15 *мм* с острием на конце. Нажим спирали на кристалл регулируется в процессе эксперимента. Напряжение на кристалл подается с потенциометра в 1 000 *ом* через сопротивления развязки 250 и 1 000 *ом*. Эти сопротивления нужны

для того, чтобы колебания звуковой частоты не замыкались через источники питания. Напряжение батареи должно быть порядка 15—20 *в*. В случае использования плавленого цинкита в паре со сталью можно использовать батарею 8—10 *в*, так как генерация такой пары обычно возникает при 6—8 *в*. После возникновения генерации напряжение можно несколько убавить, до получения максимальной громкости в телефоне. Нахождение генерирующей точки требует некоторого опыта. Параметры контура L_1, C_1 выбираются в зависимости от частоты, с которой работает экспериментатор. Удобнее всего искать генерирующую точку, если контур L_1, C_1 настроен на частоту 400—1 500 *гц*, так как эту частоту лучше всего воспринимает наше ухо. При более высокой частоте генерация проявляется в виде свиста и сильного шороха. Найденная генерирующая точка при отсутствии сотрясения работает довольно устойчиво значительное время.



Фиг. 22. Принципиальная схема испытательного прибора.

Подключая различные контуры, можно заставить кристадин генерировать колебания с частотой от 50 *гц* до 2—3 *мггц*. Интересно отметить, что сам О. В. Лосев получил усиление на волне 24,3 *м*. Амплитуда колебаний, даваемых кристадином при напряжении на кристалле порядка 8 *в*, на низких частотах достигает 4 *в*. На высоких частотах амплитуда меньше и не превышает 1—1,5 *в*. Форма этих колебаний сильно зависит от качества контура. На низких частотах, где применяются катушки с сердечниками из трансформаторной стали, дающие большие потери, эта форма довольно далека от синусоидальной. Высокочастотные колебания по своей форме приближаются к синусоидальным.

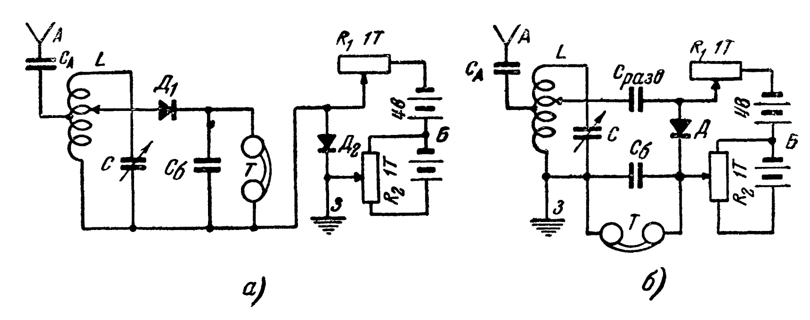
Кроме цинкита, для кристаллического усилителя можно использовать и другие кристаллы, однако они хуже и менее устойчиво генерируют.

Наиболее простые схемы детекторных приемников с кристаллическими усилителями приведены на фиг. 23.

Схема, приведенная на фиг. 23,*а*, работает довольно устойчиво и дает относительно обычного детекторного при-

емника значительное увеличение громкости, особенно при приеме дальних станций. Генерирующий кристалл уменьшает потери в контуре приемника и антенне за счет внесенного отрицательного сопротивления и тем самым, повышает добротность контура. При этом коэффициент усиления детекторного приемника, естественно, возрастает.

Настройка такой схемы производится следующим образом: с потенциометра на кристалл $Д_2$ подают полное напряжение батареи, а затем отыскивают генерирующую точку. Обычно генерация проявляется в виде свиста или шорохов в телефонных трубках. Затем потенциометром уменьшают напряжение до исчезновения свиста и регулируют настройку



Фиг. 23. Принципиальные схемы кристадинных приемников.

приемника. Одновременно необходимо регулировать потенциометром напряжение, чтобы в трубках был слышен шорох. При настройке на станцию свист и шорох пропадают, и станция прослушивается чисто и громко. После этого, в случае надобности, можно подрегулировать напряжение на кристалле.

На фиг. 23,*б* изображена другая схема детекторного приемника с генерирующим кристаллом. В ней один и тот же детектор *Д* используется в качестве детектора приемника и детектора кристадинной приставки. Преимуществом этой схемы является то, что используется только один детектор. Однако такая схема хуже генерирует и труднее настраивается. Неопытному экспериментатору начинать работу с такой схемой не рекомендуется.

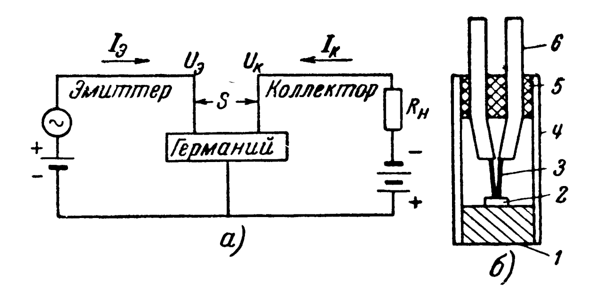
При работе с детекторным приемником, имеющим кристадинный усилитель, желательно применить более длинную антенну (40—50 *м*).

КРИСТАЛЛИЧЕСКИЕ УСИЛИТЕЛИ

Кристаллический германиевый триод, известный также под названием транзистора, несомненно заслуживает большого внимания и вызывает большой интерес среди широких кругов радиоспециалистов и радиолюбителей.

Первые сообщения о возможности усиления переменных токов с помощью этого устройства появились в начале 1948 г.

В отличие от кристадина О. В. Лосева кристаллический триод имеет разделенные входную и выходную цепи и по своим свойствам аналогичен трехэлектродной лампе — триоду.



Фиг. 24. Схема включения и устройство кристаллического триода.

1 — основание; 2 — германий; 3 — проволочки; 4 — патрон; 5 — изолятор; 6 — выводы.

Принципиальная схема включения кристаллического триода приведена на фиг. 24, *а*.

Возможность применения такой схемы для усиления сигналов была открыта при изучении действия электрического поля в электролите на вольтамперную характеристику погруженного в электролит германиевого детектора с высоким обратным напряжением.

Кристаллический триод имеет вид миниатюрного цилиндрика высотой в несколько миллиметров (фиг. 24,*б*). Основным преимуществом кристаллического триода является отсутствие вакуума и источников питания для подогрева катода. Вес кристаллического триода вместе с защитным корпусом — около 1,3 *г*.

УСТРОЙСТВО И ПРИНЦИП ДЕЙСТВИЯ КРИСТАЛЛИЧЕСКОГО ТРИОДА

Кристаллический триод (фиг. 24) состоит из пластинки германия, припаянной к металлическому диску, соединяющему германий с цилиндром, и двух точечных контактов, образованных острыми концами проволочек, соприкасающихся с верхней плоскостью германия. Расстояние между точечными контактами весьма мало — всего лишь около 0,005—0,025 *см*. Один из контактов, на который подается небольшое (около 1 *в*) положительное смещение, называется эмиттером (от слова эмиссия — испускание) и по своему назначению аналогичен управляющей сетке триода. Второй контакт называется коллектором. На него подается отрицательное смещение порядка 50 *в*. Этот контакт аналогичен аноду триода.

Нижняя поверхность пластинки германия металлизируется (обычно покрывается слоем родия). Таким образом, с этой стороны контакт имеет большую площадь и соответственно малое сопротивление.

Германий, применяемый для кристаллических триодов, относится к полупроводникам с электронной примесной проводимостью и имеет удельное сопротивление порядка 10 *ом · см*. Поверхность пластинки, вырезаемой из заготовки алмазной фрезой, подготавливается так же, как и при изготовлении детекторов с высоким обратным напряжением, т. е. полируется и протравливается азотной и плавиковой кислотами. Иногда поверхность германия обрабатывается песчаным дутьем.

Острия контактов в большинстве случаев изготавливаются из фосфористой бронзы или вольфрама, причем концы проволочек подвергаются электролитической полировке.

Контакт коллектора иногда формуется пропусканием тока порядка 200—300 *ма*, что придает ему большую устойчивость в работе.

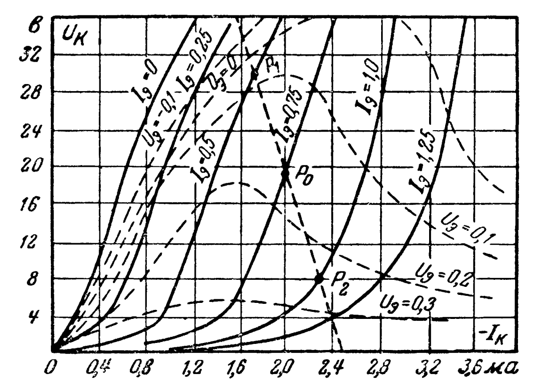
Как уже было указано выше, эмиттер находится под положительным потенциалом относительно основания (это направление соответствует прямому направлению тока в детекторе). Ток $I_э$, порядка 1 *ма*, втекает в пластину.

Коллектор находится относительно основания под отрицательным потенциалом, причем $|U_к| > |U_э|$. Направление тока обратно направлению пропускания детектора. Величина $I_к$ достигает нескольких миллиампер.

Гоком в цепи коллектора можно управлять, изменяя ток эмиттера. В частности, если менять $I_э$ при помощи изменения $U_э$ при постоянном $U_к$, то изменение тока $I_к$ коллектора может значительно превосходить изменение тока $I_э$ эмиттера.

Так как эмиттер представляет собой детектор, работающей в режиме пропускания, и имеет малое, порядка нескольких сот ом, сопротивление, то на входе достаточно небольшого переменного напряжения (и небольшой мощности), чтобы вызвать большие изменения тока эмиттера.

Коллектор же, представляющий собой запертый кристаллический детектор с высоким обратным напряжением и



Фиг. 25. Характеристики кристаллического триода.

большим сопротивлением (порядка десятков тысяч ом), может быть согласован с довольно большим нагрузочным сопротивлением $R_н$. При этом переменное напряжение и мощность в цепи нагрузки значительно превышают входные.

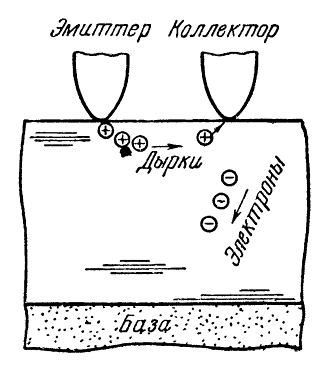
Усиление по мощности в наиболее благоприятных случаях превышает 100 (20 *дб*).

На фиг. 25 приведены характеристики эксперименталь ного кристаллического триода, показывающие изменение вольтамперной характеристики коллектора в зависимости от тока эмиттера.

Действие кристаллического триода может быть связано с природой тока эмиттера. Поэтому усиление кристаллического триода, очевидно, можно объяснить следующим образом.

Ток эмиттера, т. е. прямой ток германиевого детектора, является в основном «дырочным» током, в отличие от типа носителей заряда внутри полупроводника. Эти «дырки» в случае обычного детектора ускоряются полем в направлении к запорному слою, где и рекомбинируют с пришедшими из глубины полупроводника электронами.

При наличии вблизи от эмиттера коллектора с его отрицательным потенциалом «дырки» притягиваются его полем и попадают в цепь коллектора (фиг. 26). Возможность такого механизма определяется наличием тонкого слоя «дырочной» проводимости на поверхности германия, а также и тем, что запорный слой в контакте коллектора имеет большое сопротивление для тока электронов из металла в полупроводник и малое сопротивление для тока дырок из полупроводника в металл.



Фиг. 26. Механизм работы кристаллического триода.

Однако это представление позволяет объяснить лишь изменение тока коллектора $I_к$ на величину, не превышающую изменение тока эмиттера $I_э$, и не объясняет наблюдающихся более значительных изменений тока коллектора при изменении тока эмиттера.

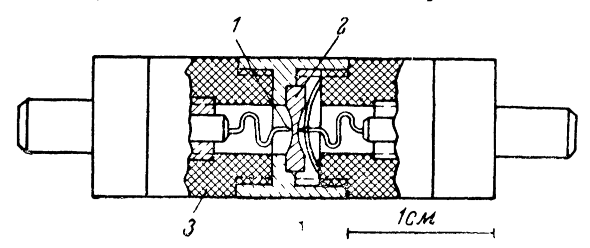
Более значительное изменение $I_э$,, вероятно, является результатом изменений в пространственном заряде запорного слоя у контакта коллектора за счет «дырочного тока». По всей вероятности, дырочный ток эмиттера меняет вид вольтамперной характеристики коллектора (фиг. 25).

Напомним, что выпрямляющие свойства германиевого детектора обусловливаются внутренним запирающим барьером, возникающим у свободной поверхности и не зависящим от металлического контакта. Этот барьер вблизи поверхности включает в себя весьма тонкую, порядка 10^{-6} *см*, область р-проводимости.

Первые опыты с кристаллическим триодом, в которых поверхность германия предварительно окислялась (затем слой окиси снимался и не участвовал в работе триода), указывали на наличие незначительной поверхностной проводимости, порядка 0,0005—0,002 $ом^{-1} \cdot см^{-1}$. Однако и не подвергавшие-

ся окислению поверхности, не показавшие заметной проводимости, как оказалось, вполне пригодны для кристаллических триодов.

Дальнейшие опыты показали, что усиление может быть получено также и в коаксиальном устройстве (фиг. 27), где не может быть сомнений в том, что «дырки» проходят сквозь слой германия типа n от эмиттера к коллектору.



Фиг. 27. Устройство коаксиального кристаллического триода.
1 — точечный контакт; *2* — германий; *3* — изолятор.

ХАРАКТЕРИСТИКИ КРИСТАЛЛИЧЕСКОГО ТРИОДА

Статические характеристики кристаллического триода полностью определяются четырьмя переменными, в качестве которых можно взять токи эмиттера и коллектора I и $I_к$ и соответствующие напряжения $U_э$ и $U_к$. Разности потенциалов отсчитываются от основания (базы) кристаллического триода. Таким образом, в схеме, указанной на фиг. 24,*а*, $I_э$ и $U_э$ положительны; $I_к$ и $U_к$ — отрицательны.

Независимыми переменными являются только две из четырех (вообще говоря, за независимые переменные может быть выбрана любая пара).

Так как все поля в полупроводнике вне областей пространственного заряда, непосредственно окружающих точечные контакты, определяются токами, то за независимые переменные удобнее принять именно токи $I_э$ и $I_к$, так как $I_э$ определяет вольтамперную характеристику коллектора. (Кроме того, напряжения являются однозначными функциями токов, тогда как токи, вследствие влияния обратной связи, могут быть двухзначными функциями напряжений.)

Приводимые на фиг. 25 характеристики типичны для опытных образцов кристаллических триодов и наглядно

показывают, как влияют токи эмитетра на вольтамперную характеристику коллектора. Кривая при $I_э = 0$ представляет собой обычную обратную характеристику германиевого детектора. С увеличением тока эмиттера кривые сдвигаются вправо. Изменение $I_к$ при постоянном значении $U_к$ превосходит соответствующее изменение $I_э$ на величину коэффициента усиления по току:

$$\alpha = -\left(\frac{\Delta I_к}{\Delta I_э}\right)_{U_к = \text{const}}.$$

Численное значение коэффициента α обычно равно от 2 до 3. Пунктирные кривые на этом рисунке соответствуют постоянным значениям потенциала эмиттера. В правой части $U_к$ падает с ростом $I_э$, что указывает на отрицательное входное сопротивление. Это объясняется обратным влиянием тока коллектора на характеристику эмиттера. Ток коллектора $I_к$ снижает потенциал поверхности германия вблизи эмиттера и изменяет эффективное смещение последнего на величину $R_с \cdot I_к$, где $R_с$ — сопротивление обратной связи, зависящее в свою очередь от токов. Эффективное смещение эмиттера будет равно $U_э - R_с \cdot I_к$, и можно записать, что

$$I_э = \varphi (U_э - R_с \cdot I_к).$$

В некоторых случаях $R_с$ падает с ростом $I_э$ вследствие роста проводимости германия вблизи контактов при прохождении токов в прямом направлении. Изменение $I_э$ в зависимости от $(U_э - R_с \cdot I_к)$ может привести к еще большему росту $I_к$, которое через обратную связь увеличит $I_э$ и режим станет неустойчивым. В этом одна из причин, ограничивающих допустимое усиление кристаллического триода.

На фиг. 25 указана нагрузочная линия, соответствующая напряжению питания в цепи коллектора 100 *в* и нагрузке 40 000 *ом*. Уравнение этой линии:

$$U_к = -100 - 40 \cdot 10^3 \cdot I_к.$$

Нагрузка $R_н$ примерно равна сопротивлению коллектора, даваемому наклоном прямолинейных отрезков характеристики.

Если рабочий отрезок линий нагрузки заключен между точками P_1 и P_2 и амплитуда напряжения на выходе около 8 *в*, а амплитуда тока около 0,2 *ма*, то соответствующие величины на входе транзистора равны 0,07 и 0,18, так что усиление по мощности составит

$$N = \frac{8 \cdot 0{,}2 \cdot 10^{-3}}{0{,}07 \cdot 0{,}18 \cdot 10^{-3}} = 125.$$

Рассмотрим теперь динамические характеристики кристаллического триода.

В случае малых отклонений от рабочей точки P_0 можно записать:

$$\Delta U_э = R_{11} \cdot \Delta I_э + R_{12} \cdot \Delta I_к,$$

$$\Delta U_к = R_{21} \cdot \Delta I_э + R_{22} \cdot \Delta I_к.$$

За независимые переменные здесь приняты также токи $I_э$ и $I_к$. Приращения токов соответствуют небольшим отклонениям, т. е. сигналу малой амплитуды на входе.

Коэффициенты R положительны, имеют размерность сопротивления и определяются следующим образом:

$$R_{11} = \left(\frac{\Delta U_э}{\Delta I_э}\right)_{I_к = \text{const}};$$

$$R_{12} = \left(\frac{\Delta U_э}{\Delta I_к}\right)_{I_э = \text{const}};$$

$$R_{21} = \left(\frac{\Delta U_к}{\Delta I_э}\right)_{I_к = \text{const}};$$

$$R_{22} = \left(\frac{\Delta U_к}{\Delta I_к}\right)_{I_э = \text{const}}.$$

Для транзистора, характеристики которого приведены на фиг. 25 при $I_э = 0{,}75$ *ма*, $I_к = -2$ *ма*, они имеют следующие значения: $R_{11} = 800$ *ом*; $R_{12} = 300$ *ом*; $R_{21} = 100\,000$ *ом*; $R_{22} = 40\,000$ *ом*. Коэффициент R_{11} представляет собой входное сопротивление при заданном $I_к$; R_{12}

соответствует сопротивлению обратной связи; отношение $\frac{R_{21}}{R_{22}}$ равно коэффициенту усиления тока α. R_{22} — сопротивление коллектора при заданном токе $I_э$ и равно 10 000 — 50 000 *ом*, причем с изменением $I_э$ оно меняется сравнительно мало. Усиление по мощности схемы изображенной на фиг. 24, зависит от выбора рабочей точки и нагрузки в цепи коллектора.

Положительная обратная связь, определяемая сопротивлением R_{12}, увеличивает усиление и дает возможность получать очень большое усиление вблизи порога генерации. Максимальное усиление без учета обратной связи достигается, когда $R_н$ равно сопротивлению коллектора R_{22} и полное сопротивление генератора равно сопротивлению R_{11}, и в этом случае

$$N = \alpha^2 \cdot \frac{R_{22}}{4 \cdot R_{11}}.$$

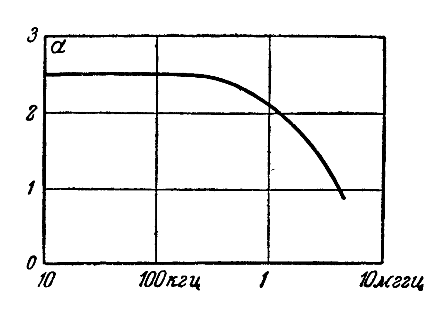
Эта величина равна отношению мощности сигнала, выделяющегося в $R_н$, к мощности сигнала, приходящего на вход кристаллического триода. Подставляя приведенные выше коэффициенты R, получим для кристаллического триода, характеристики которого приведены на фиг. 25, усиление около 80. Разница с приведенным выше значением $N = 125$ объясняется влиянием обратной связи.

Наибольшая частота сигналов, которые можно усиливать кристаллическим триодом, по имеющимся в настоящее время данным, равна примерно 10 *мггц*. Это ограничение обусловлено временем прохождения „дырок" между точечными контактами в германии, осуществляющих взаимосвязь токов эмиттера и коллектора.

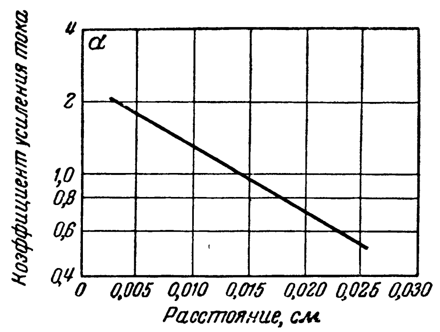
На фиг. 28 изображена частотная характеристика кристаллического триода, из которой видно, что значение $\alpha > 1$ соответствует частоте около 2 *мггц*. Однако усиление мощности сигнала имеет место и при $\alpha < 1$ за счет разницы характеристик эмиттера и коллектора. Из приведенных выше соображений видно, что расстояние между остриями электродов должно сильно влиять на работу кристаллического триода.

Как и следовало ожидать, ток эмиттера с удалением последнего от коллектора оказывает все меньшее и

меньшее влияние. R_{21} и α с увеличением расстояния S между остриями (фиг. 29) падают. В противоположность германиевому детектору, влияние температуры на работу кристаллического триода сказывается слабо. Обратная характеристика германиевого диода быстро меняется с температурой, причем зависимость тем сильнее, чем выше обратное сопротивление. В кристаллическом триоде формовка контакта коллектора приводит к значительному снижению этого сопротивления, и влияние температуры не сильно сказывается на работе триода. Сопротивление обратной связи R_{12} сравнительно мало зависит от температуры. Коэффициент усиления тока α с температурой растет. Рост α с температурой может быть скомпенсирован падением отношения $\frac{R_{21}}{R_{11}}$, что иногда приводит к отрицательному температурному коэффициенту полного усиления сигнала кристаллическим триодом.



Фиг. 28. Частотная характеристика кристаллического триода.



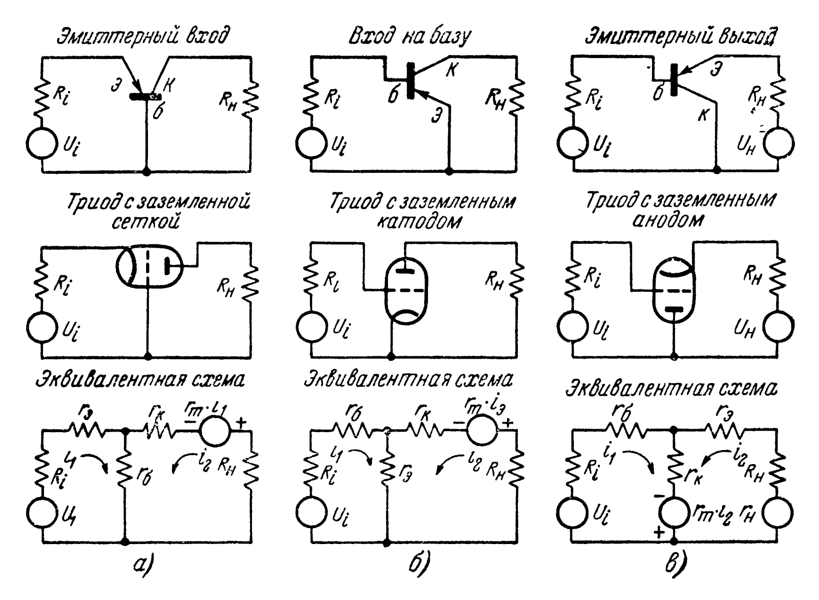
Фиг. 29. Зависимость коэффициента усиления от расстояния между электродами.

Уровень шумов кристаллических триодов высок Так, при работе на частоте около 1 000 *гц* шумовой фактор равен 55—70 *дб*, что значительно превышает уровень шумов обычных вакуумных триодов. Однако шумы кристаллического триода сильно падают при переходе в область радиочастот.

Отдаваемая кристаллическим триодом мощность не превышает 25 *мвт*, так как сила тока, которую можно приложить к тонкому острию без опасения его оплавить, невелика.

СХЕМЫ ВКЛЮЧЕНИЯ КРИСТАЛЛИЧЕСКОГО ТРИОДА

На фиг. 30 изображены три основные возможные схемы включения кристаллических триодов. Здесь R_i — внутрен-



Фиг. 30. Принципиальные и эквивалентные схемы включения кристаллического триода.

нее сопротивление генератора; $r_э$ — сопротивление запирающего слоя эмиттера; $r_б$ — сопротивление объема (толщи) проводника; $r_к$ — контактное сопротивление коллектора; r_m — сопротивление обратной связи.

Схема, представленная на фиг. 30,*а*, называемая схемой эмиттерного входа, аналогична схеме включения триода с заземленной сеткой.

Уравнения контурных токов эквивалентной схемы:

$$i_1 \cdot (R_i + r_э + r_б) + i_2 \cdot r_б = U_i;$$

$$i_1 \cdot (r_б + r_m) + i_2 (R_н + r_к + r_б) = 0.$$

Входное сопротивление схемы:

$$R_{11} = r_э + r_б - \frac{r_б \cdot (r_б + r_m)}{R_н + r_к + r_б}.$$

Выходное сопротивление:

$$R_{22} = r_к + r_б - \frac{r_б \cdot (r_б + r_m)}{R_н + r_к + r_б}.$$

Типовые величины схемы:

При $R_i = 500$ *ом* и $R_н = 20\,000$ *ом* $R_{11} = 280$ *ом* и $R_{22} = 9\,600$ *ом*; усиление мощности ≈ 17 *дб*; усиление напряжения ≈ 40; усиление тока около 1; максимальная выходная мощность с допустимыми искажениями 20 *мвт*.

Схема вход на базу (фиг. 30,*б*) аналогична включению триода с заземленным катодом. Коллектор кристаллического триода в этом случае аналогичен аноду лампы. Этот усилительный каскад, в отличие от схемы эмиттерный вход, меняет фазу сигнала на 180°. При малых значениях $R_н$ схема может генерировать колебания (обычно в области звуковых частот).

Уравнение контурных токов эквивалентной схемы входа на базу следующие:

$$i_1 \cdot (R_i + r_б + r_э) + i_2 \cdot r_э = U_i;$$

$$i_1 (r_э - r_m) + i_2 \cdot (R_н + r_э + r_к - r_m) = 0.$$

Входное сопротивление схемы

$$R_{11} = r_б + r_э + \frac{r_э \cdot (r_m - r_э)}{R_н + r_э + r_к - r_m}.$$

Выходное сопротивление

$$R_{22} = r_к + r_э - r_m + \frac{r_э (r_m - r_э)}{R_н + r_б + r_э},$$

Типовые величины схемы:

При $R_i = 500$ *ом* и $R_н = 20\,000$ *ом* $R_{11} = 2\,100$ *ом* и $R_{22} = 6\,900$ *ом*; усиление мощности 23 *дб*: усиление напряжения 20; усиление тока 10; максимальная выходная мощность с допустимыми искажениями 20 *мвт*.

Схема, изображенная на фиг. 20, *в*, часто называется эмиттерный выход. Она может быть применена для усиления сигнала в обе стороны, причем при усилении слева направо (сигнал подается на базу) схема не меняет фазы сигнала, а при работе справа налево (сигнал подается на эмиттер) меняет фазу на 180°. Увеличение R_i ведет к меньшей устойчивости работы, а увеличение $R_н$ увеличивает устойчивость. Уравнения контурных токов эквивалентной схемы эмиттерного выхода:

$$i_1 \cdot (R_i + r_б + r_m + r_к) + i_2 \cdot (r_к - r_m) = U_i;$$

$$i_1 \cdot r_к + i_2 (R_н + r_э + r_к - r_m) = U_н.$$

Входное сопротивление схемы (при работе слева направо):

$$R_{11} = r_б + r_к + \frac{r_к \cdot (r_m - r_к)}{R_н + r_э + r_к - r_m}.$$

Выходное сопротивление

$$R_{22} = r_э + r_к - r_m + \frac{r_к \cdot (r_m - r_к)}{R_i + r_б + r_к}.$$

Типовые величины схемы:

При $R_i = 20\,000$ *ом* и $R_н = 10\,000$ $R_{11} = 41\,000$ *ом* и $R_{22} = 7\,600$; усиление мощности 16 *дб*; усиление напряжения меньше 1; усиление тока 40; максимальная выходная мощность с допустимыми искажениями 1 *мвт*.

В последнее время был сконструирован кристаллический тетрод, имеющий три точечных контакта, причем два из них являются эмиттерами. Все контакты расположены треугольником на равных расстояниях, по 0,005 *см* друг от друга. Такой тетрод был применен в схеме преобразователя частоты и, как выяснилось, обе частоты f_1 и f_2 можно было доводить до 200 *мггц*, так что промежуточная частота $f_1 - f_2$ не превышала нескольких мегагерц, т. е. области обычной работы кристаллического триода.

Из-за высокого уровня шумов применение кристаллических триодов для качественного усиления звуковых частот затруднительно. Кроме того, кристаллический триод не может отдавать большой полезной мощности, и обычно эта мощность не превышает 25 *мвт*, что совершенно не-

достаточно для сколько-нибудь удовлетворительного громкоговорящего приема. Однако уже сейчас разработаны и испытаны различные типы электронных приборов, использующих кристаллические триоды. И совершенно ясно, что в ближайшем будущем кристаллические триоды и тетроды выйдут на широкую дорогу практического использования.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В настоящее время разработаны и испытаны различные типы электронных приборов, использующих кристаллические триоды и детекторы.

Построен телефонный усилитель, устанавливаемый у абонента и получающий все питание с центральной станции.

Разработаны супергетеродинные вещательные портативные приемники без ламп. Они состоят из высокочастотного усилителя, смесителя, трех каскадов промежуточной частоты. Выходной каскад обычно симметричный. Всего в приемниках, таким образом, применяется 10—12 кристаллических триодов и два-три детектора. Приемники рассчитаны на громкоговорящий прием станций и обеспечивают 25 *мвт* выходной мощности.

Разработаны схемы видеоусилителей для телевизионных приемников, в которых за счет применения кристаллических триодов значительно уменьшено общее количество ламп.

Несомненно, что этому достижению науки и техники предстоит большое будущее и оно вызовет нарастающий интерес у широких масс радиоспециалистов и радиолюбителей. Долгом последних является оказать посильную помощь в изыскании новых кристаллов, обеспечивающих надежную работу триодов и детекторов и разработку упрощенной технологии приготовления кристаллов и игл.

Цена 1 руб. 80 коп.